

Dégradations du béton

Remarques préliminaires	240	8.8 Dégradations dues à la réaction alcalis-granulats	272
8.1 Colorations	241	8.8.1 Introduction	272
8.1.1 Introduction	241	8.8.2 Typologie apparente	272
8.1.2 Typologie apparente	242	8.8.3 Causes et mesures préventives	274
8.1.3 Causes et mesures préventives	243	8.9 Dégradations liées à la corrosion de l'armature	275
8.2 Ségrégation et perte de pâte ou de mortier fin	246	8.9.1 Introduction	275
8.2.1 Introduction	246	8.9.2 Typologie apparente	275
8.2.2 Typologie apparente	246	8.9.3 Causes et mesures préventives	276
8.2.3 Causes et mesures préventives	246		
8.3 Efflorescences	250		
8.3.1 Introduction	250		
8.3.2 Typologie apparente	250		
8.3.3 Causes et mesures préventives	251		
8.4 Fissures	253		
8.4.1 Introduction	253		
8.4.2 Typologie apparente	254		
8.4.3 Causes et mesures préventives	255		
8.5 Dégradations dues au gel/dégel en l'absence ou en présence de sels de déverglaçage	260		
8.5.1 Introduction	260		
8.5.2 Typologie apparente	260		
8.5.3 Causes et mesures préventives	261		
8.6 Dégradations dues aux attaques chimiques dissolvantes	264		
8.6.1 Introduction	264		
8.6.2 Typologie apparente	264		
8.6.3 Causes et mesures préventives	265		
8.7 Dégradations dues aux attaques par des sulfates	268		
8.7.1 Introduction	268		
8.7.2 Typologie apparente	269		
8.7.3 Causes et mesures préventives	270		

Remarques préliminaires

On désigne par le terme de dégradation, un affaiblissement de la structure du matériau. Les dégradations peuvent apparaître sous diverses formes. On distingue, en simplifiant, les dégradations survenues avant la mise en service, c.-à-d. immédiatement après la confection du béton, et les dégradations se développant pendant la durée de service, c.-à-d. après un certain vieillissement et/ou sous des sollicitations externes.

Par contre, il s'agit d'un défaut si le béton ne présente pas, au moment de la réception de l'ouvrage, les propriétés convenues contractuellement, p. ex. en relation avec son aspect, sa durabilité et sa résistance. L'évaluation des défauts et des dégradations se base sur la considération de leur étendue, leur intensité et leurs effets sur la sécurité structurale, l'aptitude au service et la durabilité d'un élément d'ouvrage ou de l'ouvrage. Les critères d'évaluation dépendent des exigences convenues lors du projet pour les phases d'exécution et d'utilisation de l'ouvrage.

Les connaissances des causes et des mécanismes de dégradation sont indispensables pour leur interprétation et l'évaluation de leurs conséquences. Elles constituent la base pour des analyses de risque, la définition de l'entretien nécessaire et le choix des mesures de protection et de remise en état.

Le béton est un matériau de construction très durable, à condition que la composition soit adéquate et que l'exécution soit réalisée selon les règles de l'art. La figure 8.0.1 montre une carotte prélevée dans un revêtement routier en béton (Cant. Argovie), qui a été construit en 1935 et démolé en 2011 au cours d'une réfection.

Evaluation du revêtement en béton Hellgasse, Möriken-Wildegg par le TFB, Wildegg:

- Composition du béton: il est frappant de constater les rapports E/C visés très bas (0.30 à 0.40). Selon les analyses microscopiques, les valeurs atteintes se situent entre 0.40 et 0.45, donc plus élevées que les valeurs visées, mais toujours très basses du point de vue actuel.
- Propriétés du béton durci: aujourd'hui le béton possède une haute résistance à la compression, une haute résistance au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage, une haute résistance aux chlorures et une faible perméabilité à l'eau. Ceci s'explique par les rapports E/C bas.
- Malgré une exposition longue aux sels de déverglaçage, la pénétration des chlorures dans le béton est bien moindre que celle des ouvrages routiers plus jeunes, fortement exposés aux sels. Ceci vient du fait que le béton présente une structure très dense et qu'il a été exposé aux sels pour la première fois à un âge déjà avancé (remarque: le déblayage complet et le salage des routes n'a commencé en Suisse que dans les années 1960). Grâce à sa structure dense, le béton possède, malgré une faible teneur en air, une haute résistance au gel en présence de sels de déverglaçage.
- L'armature, avec une épaisseur d'enrobage de 45 mm, ne montrait pratiquement pas de signes de corrosion.

Fig. 8.0.1:
Carotte du revêtement routier de la «Hellgasse» à Möriken-Wildegg, construit en 1935.
(Source: Technik und Forschung im Betonbau, Wildegg).



8.1 Colorations

8.1.1 Introduction

Les colorations constituent un changement de la teinte de la surface du béton, causées p.ex. par la composition du béton, le système de coffrage, l'exécution et/ou les conditions d'environnement.

Le béton présente déjà des variations de teinte en fonction de ses matières premières (composants) et de sa mise en œuvre. La figure 8.1.1 illustre les variations de la teinte grise de bétons de composition identique, mais dont une propriété ou un composant a été modifié. Les bétons confectionnés avec un même type de ciment, mais provenant de différentes cimenteries, affichent des teintes grises différentes. Les bétons avec un rapport E/C élevé apparaissent plus clairs que les bétons avec un rapport E/C bas. Pour un rapport E/C identique, les bétons à consistance molle sont plus clairs que les bétons à consistance raide.

Les colorations dues à l'exécution représentent normalement un défaut, mais ne conduisent pas à une dégradation. En règle générale, elles n'ont que des effets sur l'apparence esthétique de la surface du béton et sont donc importantes surtout pour le béton de parement. Les basses températures régnant lors de la mise en place du béton favorisent l'apparition de colorations. Grâce aux mesures supplémentaires comme l'élévation de la température du béton frais, le chauffage et/ou le recouvrement des éléments d'ouvrage, il est possible, sous certaines conditions, de réaliser des éléments en béton de parement même à basses températures (voir chapitre 7.1).

Les colorations dues au vieillissement et à l'altération (patine) dépendent du matériau et de l'exécution.

En revanche, il s'agit de taches si les colorations résultent d'un effet externe sur une surface de teinte auparavant impeccable (p.ex. traces de rubans adhésifs, de planches en bois, de films de plastique, etc.). Lors de l'évaluation, il faut faire une distinction entre les taches ou maculations et les colorations.

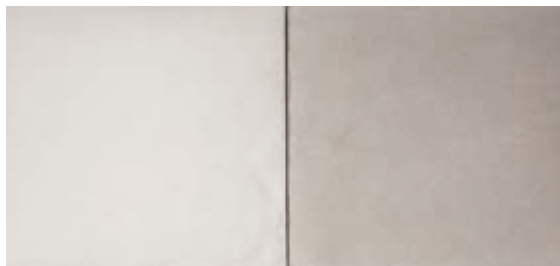


Fig. 8.1.1, en haut: Teintes de bétons de composition identique et de ciment de même type, mais provenant de deux cimenteries différentes.



Fig. 8.1.1, centre: Teintes de bétons de composition identique et de rapports E/C différents: teinte gris clair avec un rapport E/C = 0.65 (à gauche), teinte gris foncé avec un rapport E/C = 0.45 (à droite).



Fig. 8.1.1, en bas: Teintes de bétons de composition identique et de consistances différentes avec un rapport E/C = 0.45: teinte gris clair pour une consistance molle (à gauche) et teinte gris foncé pour une consistance raide (à droite).

8. Dégradations du béton

8.1 Colorations

8.1.2 Typologie apparente

La figure 8.1.2 montre quelques types de colorations qui ne font pas partie des variations de la teinte grise. Les colorations brunes des éléments préfabriqués en béton (efflorescences de carbonates colorées) sont traitées plus en détail au chapitre 8.3.

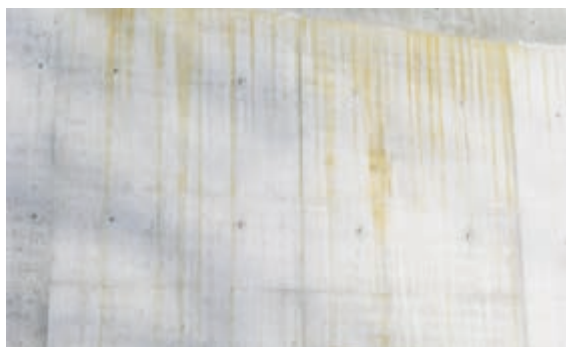
Fig. 8.1.2:
Typologie appa-
rente des colora-
tions de la surface
du béton.



Coloration claire-foncée (peau de léopard) d'une surface de béton réalisé sous des conditions hivernales.



Stries ou marbrures noires sur une surface de béton à consistance molle, qui contient des constituants à impuretés noires.



Coloration brun-rouge provoquée par des coulures d'eau chargée en rouille provenant d'une armature de raccordement non protégée.



Coloration jaune-brun d'une surface de béton au contact d'un coffrage à revêtement en résine phénolique.



Coloration rose d'une surface de béton SCC suite à l'emploi d'un coffrage métallique en acier de faible qualité et d'un produit de décoffrage inadéquat.



Coloration bleue temporaire d'un béton à base de ciment de laitier de haut-fourneau.

8.1.3 Causes et mesures préventives

Colorations claires-foncées

Causes

Malgré une planification correcte et une exécution impeccable, il arrive que des colorations claires-foncées (peau de léopard) apparaissent après la mise en place et le décoffrage de bétons de parement sous des conditions hivernales. Lors de bétonnages en hiver, la présence d’une humidité de l’air relativement élevée pendant le séchage du béton peut affecter de manière significative l’aspect de la surface du béton.

Pendant le séchage, il se crée un gradient d’humidité de l’intérieur vers l’extérieur. Celui-ci provoque un mouvement de l’humidité dans le système des pores capillaires, qui transporte l’hydroxyde de calcium dissout dans la solution interstitielle des pores, vers le front d’évaporation. Selon la teneur en eau, la porosité du béton et les conditions environnementales, le taux d’évaporation à la surface du béton peut être plus élevé que l’apport d’eau par la solution des pores arrivant à la surface. Dans ce cas, l’horizon d’évaporation migre vers l’intérieur du béton. Pendant le séchage, l’hydroxyde de calcium précipite comme carbonate au niveau du front d’évaporation.

Si la surface du béton reste humide, c.-à-d. que le front d’évaporation se trouve à la surface du béton, des efflorescences de carbonates claires se développent (voir chapitre 8.3.3). Dès que le front d’évaporation migre vers l’intérieur du béton, l’hydroxyde de calcium cristallise comme carbonate à l’intérieur des pores.

Sous de basses températures et une humidité relative de l’air élevée, le temps de migration du front d’évaporation vers l’intérieur du béton augmente, ceci crée une accumulation d’hydroxyde de calcium juste sous la surface du béton. La pâte de ciment proche de la surface du béton se densifie et la texture de la surface devient plus lisse et fermée. Ces surfaces possèdent un pouvoir de réflexion plus bas, ce qui les fait apparaître encore plus foncées (tab. 8.1.1).

Mesures préventives

Les colorations claires-foncées suite à des accumulations d’hydroxyde de calcium peuvent être influencées favorablement en décalant les bétonnages vers des périodes à conditions climatiques plus propices ou en prenant des mesures de protection hivernale, empêchant la précipitation des carbonates à la surface du béton.

Stries ou marbrures noires

Causes

Les stries noires peuvent apparaître à la surface des bétons autoplaçants ou des bétons à consistance très fluide. Les stries noires ne se forment pas dans les bétons à consistance raide à molle. Les causes sont:

- des inclusions organiques noires dans certains calcaires, p.ex. Schrattenkalk
- des poussières de charbon non incinérées dans la cendre volante ou la fumée de silice

Les composés organiques issus des matières premières sont contenus dans les additions au ciment, dans le granulats ou dans les additions au béton. A cause de leur faible masse volumique, ces composés colorants flottent à la surface du béton frais.

Mesures préventives

En cas d’emploi d’un béton autoplaçant ou d’un béton à consistance très fluide, il est recommandé d’employer des ciments, des granulats et des additions qui ne contiennent que peu de composés organiques noirs. L’évaluation de la perte au feu offre à cet effet un premier indice.

	Modes d'apparition		
	Sans coloration	Coloration foncée	Efflorescence
Taux d'évaporation	plus élevé que l'apport de la solution de pores	identique à l'apport de la solution de pores	plus faible que l'apport de la solution de pores
Front d'évaporation	à l'intérieur du béton	juste sous la surface du béton	à la surface du béton
Hydroxyde de calcium (CaOH ₂)	précipite dans les pores à l'intérieur du béton	s'accumule juste sous la surface du béton	précipite à la surface du béton

Tab. 8.1.1: Processus de transport et de cristallisation pendant le séchage.

8. Dégradations du béton

8.1 Colorations

Colorations brun-rouge

Causes

Les colorations brun-rouge peuvent apparaître lorsque l'armature de raccordement dalles-murs est exposée aux intempéries. La rouille se formant à la surface de l'acier peut être dissoute p. ex. par l'eau de pluie. Cette eau chargée de rouille peut provoquer des taches brun-rouge ou des traces de coulures en s'écoulant sur une surface de béton.

Il est très difficile d'éliminer des taches de rouille sur une surface de béton. L'eau chargée de rouille pénètre d'habitude si profondément dans le béton qu'un nettoyage superficiel ne suffit pas. Il existe des produits de nettoyage capables d'enlever les taches, mais les surfaces traitées deviennent nettement plus claires. En cas d'emploi d'un tel produit, un traitement de la surface entière est recommandé.

Mesures préventives

Les fers d'armatures exposés sont à emballer avec des feuilles de plastique et à protéger des venues d'eau. La protection nécessaire est aussi obtenue en mettant l'élément d'ouvrage à l'abri sous une tente. Une autre solution consiste à badigeonner les fers d'armature avec du lait de ciment afin de leur offrir une protection anticorrosion.

Fig. 8.1.3:
Protection des
armatures de
raccordement
vis-à-vis des
intempéries.



Colorations jaune-brun

Causes

Les colorations jaune-brun peuvent apparaître lorsque le béton est mis en place dans des coffrages à revêtement de résine phénolique, qui n'a pas suffisamment durci ou qui, à l'état durci, n'est pas suffisamment résistant aux rayons UV et aux alcalis. Les sollicitations par le rayonnement UV et par les intempéries, ainsi que la façon de stocker les panneaux de coffrage sur le chantier, sont déterminants relativement à l'apparition et à l'intensité des colorations.

Les températures élevées atteintes par l'élément d'ouvrage pendant l'hydratation peuvent accélérer la dégradation chimique de la pellicule de résine phénolique. Si un espace se crée entre le coffrage et la surface du béton, suite au retrait ou au relâchement des ancrages de coffrage, de l'eau de condensation peut se former par l'air plus frais pénétrant à l'intérieur de cet interstice. L'eau de condensation dissout les constituants phéno-

liques et coule entre le béton et le coffrage en laissant des traces jaune-brun à la surface du béton.

Mesures préventives

La résistance aux alcalis des panneaux à revêtement de résine synthétique peut être contrôlée avant leur emploi, en particulier pour la confection de béton de parement, à l'aide du test dit «de l'œil de bœuf» (application de potasse caustique pendant un court instant sur la surface du revêtement en résine phénolique).

En cas de production de béton à surfaces lisses, il faut toujours veiller à ce que les peaux de coffrages n'engendrent pas de colorations. Il est recommandé de vieillir artificiellement les panneaux de coffrages en bois absorbant avant leur premier emploi, en les enduisant avec du lait de ciment. Toute exposition au rayonnement UV et aux intempéries, ainsi qu'un stockage inadéquat sur le chantier, doivent être évités.

Colorations roses

Causes

Les colorations roses peuvent apparaître lorsque les conditions suivantes sont simultanément remplies:

- l'emploi d'un ciment à base de schistes calcinés (Optimo 4 ou Robusto 4R-S)
- une consistance très fluide du béton (SCC ou béton facile à compacter)
- un coffrage métallique (qualité d'acier oxydable)
- une huile ou un produit de coffrage inadéquat

Les ciments à schistes calcinés contiennent – dans leurs matières premières – des proportions faibles d'argiles cuites avec des minéraux ferriques (magnétite ou hématite). La coloration rose résulte de l'accumulation des composés de fer d'une épaisseur d'un à deux micromètres sur la surface de contact entre le béton et le coffrage. La concentration des oxydes de fer à la surface présente une ségrégation en relation avec les coffrages métalliques oxydables. Dans les bétons à consistance très fluide, les particules d'oxydes de fer semblent pouvoir se mouvoir plus librement et provoquer plus facilement des colorations. La probabilité d'apparition de coloration est d'autant plus grande que les températures seront basses.

Par contre, le dosage en ciment, la provenance du ciment et du granulat, le type de fluidifiant ou l'utilisation d'un entraîneur d'air n'ont aucune influence sur la probabilité d'apparition de colorations. Les colorations roses n'ont pas été constatées dans les bétons vibrés, sur des surfaces non coffrées ou dans le cas d'utilisation de coffrages en bois ou synthétiques.

Les colorations roses peuvent être éliminées facilement par un léger ponçage avec du papier de verre. Les propriétés du béton ne sont en aucun cas affectées. Un nettoyage simple à l'eau sans traitement mécanique ne suffit pas pour enlever les colorations.

Mesures préventives

Les mesures de prévention des colorations roses suivantes ont été vérifiées dans la pratique:

- l'utilisation de coffrages métalliques en acier inoxydable. Ces coffrages de parement sont facilement reconnaissables à leur couleur métallique-argenté.
- l'utilisation d'une cire plutôt qu'une huile de coffrage pour les panneaux usagés ou métalliques.

Coloration bleue

Causes

Les colorations bleues apparaissent exclusivement avec l'emploi de ciments de laitier de haut fourneau (CEM III). Elles sont induites par des teneurs faibles en sulfures dans le laitier. Les sulfures réagissent avec l'eau et forment des sulfures de calcium hydratés et des polysulfures de calcium. Ces polysulfures peuvent, à l'abri de l'air et dans un milieu alcalin (surfaces de béton coffrées), réagir avec des ions métalliques dissouts du laitier et du ciment (p.ex. fer, manganèse) et former des sulfures métalliques d'une teinte vive verte ou bleue. Ces sulfures métalliques verts ou bleus s'oxydent en composés incolores (sulfates, sulfites) au contact de l'air lorsque le béton sèche. La vitesse d'oxydation avec laquelle cette coloration du béton à base de ciment de laitier de haut fourneau peut disparaître, dépend de plusieurs facteurs:

- les conditions climatiques froides et humides ralentissent le séchage de la surface et donc la décoloration par oxydation.
- les bétons poreux avec un rapport E/C élevé se décolorent rapidement. Ainsi immédiatement après le décoffrage, c'est une surface incolore qui apparaît. Dans les bétons denses le processus dure plus longtemps.
- les éléments d'ouvrage horizontaux (dalles) qui restent plus longtemps dans le coffrage, se décolorent plus lentement.

Selon les conditions ambiantes et la structure du béton, le processus de décoloration de la surface peut durer de quelques jours à quelques mois. Au cœur des bétons denses, la coloration verte ou bleue reste préservée pendant des décennies. Ceci peut aussi avoir un effet sur des surfaces traitées ultérieurement. On suppose qu'un traitement ultérieur bouche les pores superficiels et ralentit le processus d'oxydation. Les surfaces polies peuvent montrer une coloration persistante pendant longtemps, restant visible pendant plusieurs mois. Aussi une humidification peut rendre les colorations à nouveau visibles. Le phénomène n'est pas encore entièrement expliqué.

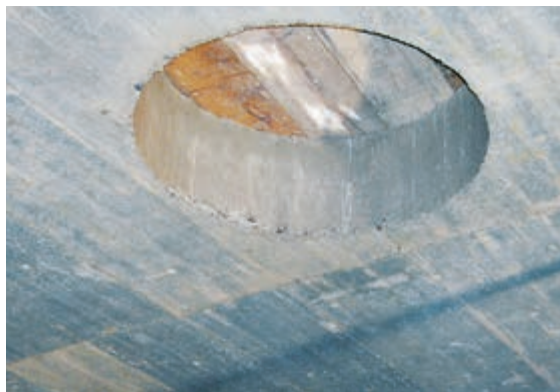


Fig. 8.1.4: Surface d'une dalle en béton, en haut: avec une coloration bleue après le décoffrage; en bas: quelques semaines plus tard décoloration complète.

Mesures préventives

Les colorations bleues et vertes n'apparaissent, en général, que dans les bétons particulièrement denses et disparaissent par elles-mêmes en quelques jours ou mois. Si une teinte claire visée doit être atteinte au plus vite, des mesures favorisant le séchage de la surface peuvent avoir un effet d'accélération de la décoloration.

8.2 Ségrégation et perte de pâte ou de mortier fin

8.2.1 Introduction

Différentes ségrégations peuvent survenir pendant ou après le transport, le transbordement, la mise en place, le compactage et le talochage du béton frais. Elles amoindrissent la qualité et l'aspect du béton. Une surface de béton rugueuse ou inégale, avec des colorations sombres, est provoquée par l'échappement de la pâte de ciment et du mortier le plus fin par les joints de coffrage non étanches. Le ressuage ou la sécrétion de l'eau représente une forme particulière de la ségrégation.

8.2.2 Typologie apparente

La figure 8.2.1 illustre quelques formes typiques de ségrégations et de perte de pâte de ciment ou de mortier fin.

8.2.3 Causes et mesures préventives

Généralités

Les constituants du béton frais peuvent se dissocier avant le raidissement. Les composants se séparent en fonction de leur taille et masse volumique sous l'effet d'une vibration trop intensive ou par gravité dans le béton frais au repos. Les grains grossiers et lourds plongent (se sédimentent), tandis que les particules fines et légères remontent (fig. 8.2.2).

La libération de l'eau de gâchage par la pâte de ciment est appelée ressuage du béton. Ce phénomène peut avoir lieu en surface et à l'intérieur du béton. Un enrichissement en pâte de ciment peut se former sous les gros granulats, lors d'une vibration excessive du béton. La création d'une structure irrégulière, notamment de la porosité capillaire, affecte le développement de la résistance et la durabilité du béton. En surface du béton, les ségrégations se signalent sous la forme de variations de teintes. Les zones enrichies en pâte de ciment restent friables, même après le durcissement du béton et ont tendance au farinage et au sablage.

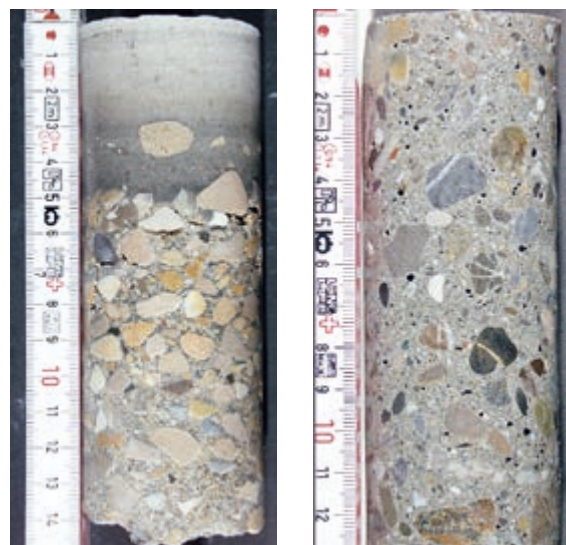


Fig. 8.2.2: Carottes de forage d'une dalle en béton, à gauche: forte sédimentation, à droite: structure homogène sans sédimentation.



Formation de larges voiles suite à des microségrégations induites par un compactage ponctuellement excessif.



Formation de larges voiles par un mélange insuffisant des déversements de béton et un ressuage de l'eau du béton frais.

Fig. 8.2.1:
Typologie appa-
rente des ségréga-
tions et des pertes
de pâte de ciment
et de mortier fin.



Ebauche d'armature à la surface suite à une microségrégation par un compactage local excessif.



Dessin des joints de coffrages non étanches induites par la perte de la pâte de ciment; au milieu des panneaux apparaissent des efflorescences claires.



Farinage et sablage à la surface d'une dalle en béton consécutifs à un fort ressuage du béton.



Canaux de remontée d'eau de gâchage en excès sur une surface verticale coffrée.



Perte de pâte de ciment et de mortier fin à travers un joint non étanche.



Nid de gravier à l'endroit du raccord dalle-mur suite à un compactage insuffisant et l'échappement de mortier fin par le joint de coffrage non étanche.

8. Dégradations du béton

8.2 Ségrégation et perte de pâte ou de mortier fin

Des températures basses, un compactage excessif, une composition pauvre en farines ou un haut rapport E/C favorisent le ressuage (fig. 8.2.3).

Ebauche de l'armature

Causes

Le reflet de la nappe extérieure de l'armature visible en surface du béton est créé par des microségrégations au niveau des particules les plus fines du béton frais. Un surcompactage local, à proximité du coffrage ou de l'armature qui entrent en résonance, en est la cause.

Mesures préventives

Un compactage trop intensif doit être évité et le pervibrateur ne doit pas toucher l'armature. En outre, les différences de température entre le béton frais et les fers d'armature de plus de 12°C sont à éviter en cas de températures ambiantes inférieures à 5–10°C. Le phénomène n'est normalement pas lié à une épaisseur d'enrobage insuffisante.

Formation de voiles

Causes

Lorsque le béton présente une tendance à la ségrégation et lorsque les tas de béton frais successivement déversés n'ont pas été suffisamment mélangés, de larges voiles peuvent apparaître. Ils se dessinent par des liserés clairs sur les surfaces des plafonds.

Des zones formant des nuages gris clairs à sombres, associés à des degrés de brillance variables, peuvent être causés par un compactage, irrégulier, insuffisant ou excessif. Il en résulte une ségrégation du béton, dont la surface peut présenter des colorations sombres.

Des voiles peuvent également apparaître lors de l'utilisation de grandes quantités d'additions (p.ex. de la cendre volante).

Mesures préventives

La mesure la plus importante consiste en un compactage maîtrisé du béton frais pour empêcher un surcompactage local. Lors du compactage, l'aiguille vibrante ne doit pas toucher le coffrage ou l'armature (voir chapitre 3.5). L'épaisseur de l'enrobage doit être impérativement respectée. Une teneur en farine assez élevée, comme p.ex. pour un béton pompé, améliore le pouvoir de rétention de l'eau du béton frais (voir chapitre 4.1). Le béton doit être mis en place en couches régulières et compacté consciencieusement en tenant compte de sa consistance.

Colorations sombres

Causes

Les températures basses retardent le temps de prise et augmentent le risque de ségrégation du béton frais. La redistribution et la perte de l'eau au niveau microscopique, induites par les ségrégations, engendrent des perturbations locales fortes de l'hydratation du ciment. Un degré d'hydratation plus faible et, en conséquence, une

porosité capillaire plus basse mènent à des colorations sombres de grande étendue, notamment les sous-faces de planchers. C'est de la même manière que des ségrégations induisent avec la perte d'eau de la pâte de ciment liées aux nids de gravier ou aux joints non étanches, des colorations sombres fortement contrastées.

Mesures préventives

Les colorations sombres induites par des ségrégations peuvent être évitées, en hiver, par l'emploi d'un accélérateur et le recours à des formulations de béton caractérisées par une meilleure capacité de rétention d'eau.

Farinage et canaux de remontée de l'eau

Causes

Le farinage résulte d'une hydratation perturbée du ciment à la surface du béton. L'eau de gâchage ressuée peut remonter le long du coffrage et laisser des traces sur la surface du béton, appelées canaux de remontée d'eau. Ce phénomène apparaît souvent lors de l'emploi de coffrages lisses non absorbants, en relation avec de fortes épaisseurs de couches de déversement.



Fig. 8.2.3: Eau (de ressuage et de pluie) sur une surface horizontale d'un béton.

Mesures préventives

La composition du béton est déterminante quant à l'apparition du ressuage du béton frais. Les points suivants doivent être respectés en ce qui concerne la formulation et la mise en œuvre du béton:

- Le béton doit avoir une teneur suffisante en farines. L'utilisation des ciments CEM II/B-M est avantageuse à cause de leur meilleur pouvoir de rétention d'eau.
- Le béton doit avoir une consistance plastique à fluide et sa teneur en eau doit être limitée (rapport E/C < 0.6).
- L'emploi d'un coffrage absorbant (p.ex. en lames de bois) réduit le risque d'apparition de canaux de remontée d'eau.
- Le béton doit être coulé avec une vitesse constante et en couches régulières horizontales d'une épaisseur de 50–70 cm, afin de minimiser les ségrégations.
- Le béton coulé doit être compacté rapidement et régulièrement.

Nids de gravier

Causes

Les nids de gravier se forment lorsque le béton se décompose, p.ex. à cause d'une hauteur de déversement trop grande ou d'un compactage ponctuellement insuffisant. Un coffrage non étanche, d'où la pâte de ciment et le mortier fin peuvent s'échapper, peut aussi provoquer des nids de gravier. Une armature trop dense ou un écartement des barres d'armature trop faible par rapport au diamètre maximal du granulats peuvent également conduire à des nids de gravier, voire un remplissage incomplet des coffrages (fig. 8.2.4).

Les nids de gravier apparaissent surtout dans les zones de bordure et dans les parties inférieures des éléments d'ouvrage. Ils se font remarquer à cause de leur texture et de leur teinte plus sombre. Pour le béton de parement (SBK2 à S), ils constituent un défaut et peuvent mettre l'étanchéité et la durabilité en cause.

Si les nids de gravier sont petits et sans effets sur la sécurité structurale et la durabilité, il est souvent préférable de renoncer à une réparation, celle-ci risquant d'altérer plus encore la qualité optique du béton de parement.

Mesures préventives

La formation des nids de gravier peut être réduite par les mesures suivantes :

- Lors de la planification des ouvrages en béton de parement, il faut adapter les dimensions des éléments d'ouvrage en fonction de la densité et de la disposition des barres d'armature, ainsi que des propriétés du béton, de manière à ce que la mise en place et le compactage soient possibles sans entrave.
- L'écartement des barres d'armature doit être plus grand que le diamètre maximal du granulats et celui des barres d'armature voisines. Une attention toute particulière doit être portée aux endroits de recouvrement des barres, des ancrages et des pliages en cas de teneurs élevées en armature.
- Le béton doit posséder une granularité adéquate et une consistance adaptée aux dimensions de l'élément d'ouvrage et au mode de mise en place (voir chapitre 4.1). En général, le diamètre maximal du granulats ne devrait pas dépasser un tiers de l'épaisseur minimale de l'élément d'ouvrage.
- Le coffrage doit être étanche afin d'empêcher l'écoulement de l'eau et de la pâte de ciment. La fixation et l'étanchéification à l'endroit des joints de bétonnage, des joints de coffrage, des angles, des arêtes et des insertions sont à préparer avec le plus grand soin.
- Des ouvertures dédiées au compactage sont à prévoir dans la disposition de l'armature et du coffrage de manière à ce que le béton puisse être étalé et compacté régulièrement.
- Lorsque le transport du béton frais se fait par camion malaxeur, de longues durées de transports augmentent le risque de ségrégation. Le béton doit être malaxé

pendant au moins deux minutes immédiatement avant le déchargement.

- Le béton doit être coulé à vitesse constante et en couches horizontales d'épaisseur régulière. Pour éviter les ségrégations, la hauteur de déversement ne dépassera pas 50–70 cm au maximum (voir chapitre 3.4.3).
- Pour les parements, il est possible de prévenir les ségrégations au pied du mur par la mise en place au préalable d'une couche de béton (épaisseur env. 10 cm) avec une teneur en ciment plus élevée et un diamètre maximal du granulats réduit. Il faut veiller à ce qu'il n'en résulte pas une éventuelle différence de teinte du béton.



Fig. 8.2.4:
Disposition à densité élevée des barres d'armature.



Fig. 8.2.5:
Ouvertures pour couler et compacter le béton en cas de densité d'armature très élevée.

8.3 Efflorescences

8.3.1 Introduction

Les efflorescences sont des précipitations de sels solubles à l'eau, et où l'hydroxyde de calcium se présente sous forme d'une couche fine de cristaux. Les efflorescences sont réparties en trois classes:

- les efflorescences calcaires
- les concrétions calcaires
- les colorations brunes des produits en béton (efflorescences calcaires colorées)

Les efflorescences de grande étendue apparaissent surtout au printemps et à l'automne sur des éléments en béton jeune. Les efflorescences calcaires combinées avec des dépôts de gel silicaté sont traitées au chapitre 8.8.

Des efflorescences et concrétions peuvent se former sur de longues périodes autour des fissures sujettes à des suintements d'eau.

8.3.2 Typologie apparente

Les efflorescences calcaires sont en règle générale des dépôts fins, blancs, en voile ou tachetés, qui peuvent altérer la teinte et l'aspect d'une surface en béton. Sur des surfaces de béton de parement, notamment les surfaces teintées en noir, ces efflorescences sont difficilement acceptables. Elles n'entament ni la résistance ni la durabilité du béton.

Fig. 8.3.1:
Typologie appa-
rente des efflores-
cences.



Efflorescences calcaires sur un mur en béton.



Concrétions calcaires le long des fissures d'un mur en béton.



Colorations brunes d'un dallage en béton (efflorescences calcaires colorées).



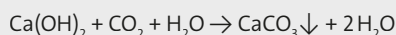
Dalle en béton fissurée avec des concrétions calcaires sous forme de stalactites.

8.3.3 Causes et mesures préventives

Efflorescences calcaires

Causes

Lors de l'hydratation du ciment, il se crée de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2). L'hydroxyde de calcium est un minéral soluble à l'eau dont la solubilité augmente lorsque la température baisse. La solution interstitielle des pores est saturée en hydroxyde de calcium. Si la solution des pores s'évapore à la surface du béton, l'hydroxyde de calcium réagit avec le dioxyde de carbone (CO_2) de l'air pour former le carbonate de calcium (CaCO_3) qui cristallise en minéral blanc insoluble à l'eau.



hydroxyde de calcium + dioxyde de carbone + eau
→ carbonate de calcium + eau

Eq. 8.3.1

La réaction de l'hydroxyde de calcium avec le dioxyde de carbone de l'air est appelée carbonatation. La carbonatation commence naturellement à la surface du béton et pénètre lentement à l'intérieur de la pâte de ciment. Le carbonate de calcium forme les efflorescences calcaires après l'évaporation de la solution des pores à la surface du béton. Le carbonate de calcium se forme toujours malgré qu'avec le temps, le front d'évaporation migre dans le béton. Le carbonate de calcium formé à l'intérieur du béton n'est plus visible comme efflorescence (tab. 8.1.1). En hiver, le danger d'apparition de taches sombres ou de voiles d'efflorescences calcaires est grand, étant donné que le front d'évaporation se situe soit à la surface soit juste en-dessous.

Dès que le béton sèche à la surface, les processus de dissolution et de diffusion, ainsi que la capacité d'efflorescences sont interrompus jusqu'à la prochaine humidification. Si un béton déjà séché, notamment au jeune âge, est humidifié de nouveau, l'hydroxyde de calcium peut être dissout dans le béton et effleur à la surface sous forme de carbonate de calcium. Les flaques d'eau sur des surfaces en béton horizontales, l'eau de pluie et de condensation sous les feuilles de plastique pendant la cure, peuvent provoquer des efflorescences calcaires. Il convient donc de planifier, à l'avance, l'évacuation de l'eau de pluie par des mesures supplémentaires, comme une pente suffisante des surfaces horizontales ou des larmiers pour des surfaces verticales.

Si les efflorescences n'apparaissent que localement, il est possible de les éliminer par un brossage à sec à l'aide d'un morceau de verre cellulaire ou, sous la direction d'un spécialiste et en respectant soigneusement les indications du fabricant, de les traiter avec des produits spéciaux acides, comme p.ex. l'acide aminosulfonique dilué ou l'acide

phosphorique dilué. Les efflorescences légères peuvent disparaître par elles-mêmes au cours des années si l'élément en béton est exposé à la pluie (eau douce, pluie acide).

Mesures préventives

Il n'est souvent pas possible d'éviter l'apparition des efflorescences à cause d'un grand nombre de facteurs d'influence affectant tant le béton de parement que les produits en béton. Les mesures suivantes peuvent toutefois diminuer le risque de leur apparition:

- la production d'un béton aussi dense et exempt de fissures que possible.
- le recouvrement de la fente entre la surface du béton et la peau de coffrage lors du bétonnage des parements et des dalles pour les protéger vis-à-vis des infiltrations de l'eau de pluie.
- l'évacuation des eaux de pluie.
- éviter le décoffrage des parements pendant des épisodes pluvieux ou immédiatement après.
- effectuer une cure avec des films plastiques, à condition que ces derniers ne touchent pas la surface du béton afin d'éviter que l'eau de condensation ne puisse pas être absorbée par le béton.
- éviter par principe les mesures de cure basées sur un apport d'eau.
- la protection des surfaces verticales ou inclinées du béton jeune vis-à-vis des écoulements d'eau. Recouvrement des couronnements de murs. Ne pas superposer directement les produits en béton et les éléments préfabriqués pendant les premiers jours.
- l'utilisation de ciments contenant des constituants hydrauliques latents ou pouzzolaniques. Ceux-ci réduisent la teneur en hydroxyde de calcium, respectivement lient une partie de l'hydroxyde de calcium dans leurs phases hydratées insolubles et réduisent la perméabilité du béton. Les ciments Modero, Robusto et Optimo se prêtent particulièrement bien à cet emploi.
- l'application d'un traitement hydrofuge ou d'une imprégnation transparente de la surface en béton.

Concrétions calcaires

Causes

En cas de percolations continues de l'eau à travers les fissures et les joints non étanches ou un béton très poreux, de grandes quantités d'hydroxyde de calcium peuvent être lessivés de la pâte de ciment. En arrivant à la surface du béton, il forme alors des dépôts et encroûtements massifs, appelés des concrétions calcaires (fig. 8.3.2).

Mesures préventives

Les mêmes mesures préventives préconisées pour les efflorescences calcaires s'appliquent aux concrétions calcaires. La première et indispensable mesure est d'éliminer le suintement d'eau à travers les fissures, les joints non étanches ou une structure poreuse, en faisant recours à des injections ou à des traitements hydrofuges.

Fig. 8.3.2:
Concrétions
calcaires le long
d'une fissure.



Fig. 8.3.3:
Test de coloration
brune du ciment:
échantillon sans
potentiel de
coloration brune
(à gauche) et
échantillon avec
potentiel de
coloration brune
(à droite).



Coloration brune des produits en béton

Causes

Les colorations brunes, souvent aussi appelées colorations jaunes, représentent une forme spéciale, plus rare, d'efflorescence calcaire. Ces colorations résultent des processus de dissolution, le plus souvent des composés de fer solubles et oxydables en combinaison avec des efflorescences calcaires. Les composés de fer solubles cheminent à travers le système de pores jusqu'à la surface du béton, où ils s'oxydent. Ils peuvent, même en très faibles concentrations, créer des colorations jaunes à brunes bien visibles. Les composés de fer peuvent provenir de l'eau de gâchage, du sable, des additions ou du ciment. Un test spécifique permet de déterminer le potentiel de coloration brune des ciments. Cet essai consiste à simuler des efflorescences de telle manière à ce que les substances efflorescentes et colorantes soient transportées à la surface de l'échantillon (fig. 8.3.3).

Ces efflorescences apparaissent avec une rapidité variable en fonction du système de pores et des influences météorologiques. Elles peuvent se faire remarquer seulement après plusieurs années d'exposition aux intempéries ou dans de rares cas, sur des produits de béton de jeune âge. Elles ne peuvent pas être éliminées et il est important de ne pas les confondre avec des traces de rouille. Les colorations brunes apparaissent le plus souvent sur des produits, comme des éléments en béton d'une consistance terre humide, par exemple. Ces bétons ont une structure très poreuse avec de nombreux vides de compactage et de ce fait un pouvoir plus élevé d'absorption d'eau et d'évaporation. Les colorations se forment fréquemment sous des conditions estivales, lorsque les périodes d'humidification et de séchage s'alternent.

Mesures préventives

Le potentiel de coloration peut être réduit à l'aide de mesures liées à la technologie du béton. Une optimisation de la granularité du granulat et l'utilisation des ciments composés, comme p. ex. l'Optimo 4 ou le Robusto 4R-S, améliorent la compactibilité du béton et diminuent la porosité, respectivement l'humidification du béton. De cette manière, la mise en solution et le transport des composés de fer à la surface du béton sont freinés. Si l'évaporation est entravée, aucune coloration brune ne survient.

8.4 Fissures

8.4.1 Introduction

Généralités

Des fissures peuvent se développer dans le béton frais suite à une diminution brusque du volume de la zone superficielle du béton par la dessiccation. Ce dessèchement rapide est favorisé par une faible humidité de l'air, le vent, l'ensoleillement et des températures défavorables. Par contre après la prise, dans le béton à jeune âge, des fissures se forment lorsque la résistance à la traction est dépassée par les tensions de traction résultant des autocontraintes et des contraintes imposées, ainsi que des contraintes induites par des charges externes.

Malgré sa haute résistance à la compression, le béton ne possède qu'une très faible résistance à la traction, de l'ordre de 2 à 3 N/mm². Dans un élément soumis à une contrainte de traction ou de flexion, le béton reprend les contraintes de compression, et l'armature celles de traction. Une fois fissuré, le béton peut transmettre des contraintes significatives à l'acier d'armature.

Les ouvertures des fissures doivent être limitées afin de ne pas entamer la durabilité, l'étanchéité et l'apparence de l'ouvrage. Les exigences relatives à la fissuration, notamment l'ouverture admissible des fissures, sont à définir dans les documents contractuels avant l'exécution des travaux entre les parties. La limitation de la fissuration joue un rôle essentiel dans le projet, pour la définition du taux d'armature et des étapes de bétonnage et, de ce fait, aussi vis-à-vis des coûts de la construction.

Aptitude au service

Durabilité

Les fissures représentent des points faibles dans la structure du béton. Les substances corrosives, néfastes pour le béton et l'armature pénètrent selon l'épaisseur et la profondeur des fissures plus ou moins rapidement dans le béton. Pour assurer la durabilité de l'ouvrage, les épaisseurs maximales des fissures admissibles pour les classes d'exposition XC et XD figurent au tableau 8.4.1.

Classes d'exposition (CH)	Epaisseurs maximales des fissures [mm]
XC1, XC2	0.4 à 0.6
XC3, XC4	0.3 à 0.4
XD1, XD2a	0.3 à 0.4
XD2b, XD3	0.2 à 0.3

Tab. 8.4.1: Epaisseurs maximales des fissures admissibles pour les classes d'exposition XC et XD.

Apparence

Les fissures avec des ouvertures > 0.5 mm sont visibles, même à une distance d'observation importante (> 5 m) de l'élément de construction, et sont le plus souvent perçues comme gênantes. La limitation de l'ouverture des fissures selon des critères esthétiques dépend directement de la distance d'observation, de l'éclairage, de la texture de la surface et du niveau d'exigence de l'observateur. La figure 8.4.1 offre une évaluation de l'ouverture des fissures en fonction du niveau d'exigence esthétique et de la distance d'observation (voir chapitre 7.1).

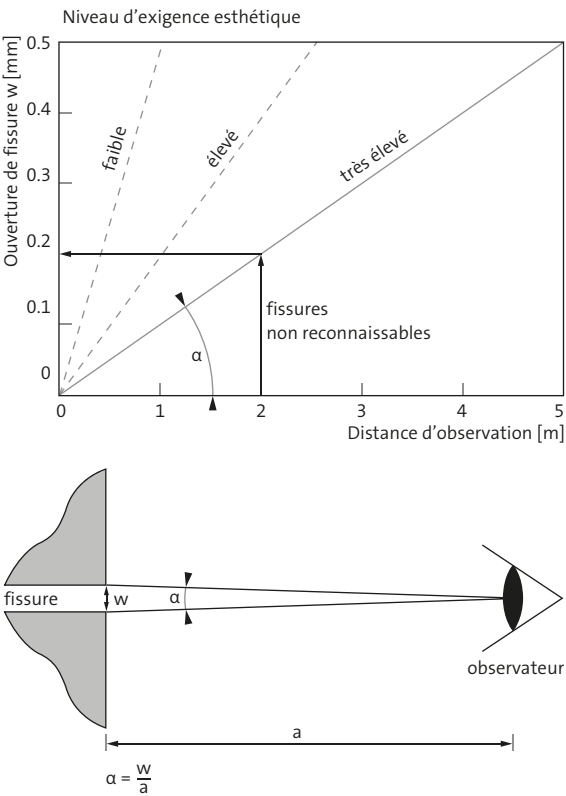


Fig. 8.4.1: Evaluation de l'ouverture des fissures en fonction du niveau d'exigence esthétique et de la distance d'observation.

8. Dégradations du béton

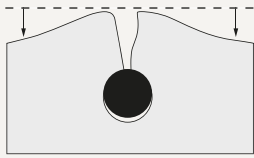
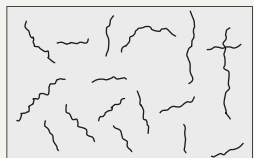
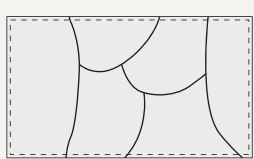
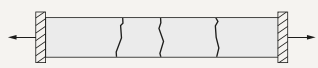

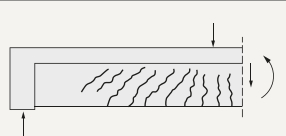
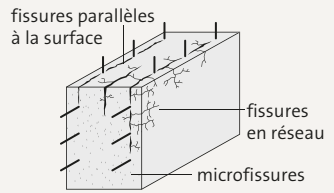
8.4 Fissures

8.4.2 Typologie apparente

Le tableau 8.4.2 récapitule les types de fissures les plus importants et leur typologie apparente avec une courte description dans l'ordre de leur apparition au cours du temps dans l'ouvrage. Les points suivants sont essentiels pour la caractérisation des fissures:

- le moment de la formation des fissures
- la largeur des fissures (ouverture et changements)
- la profondeur et le cheminement dans la structure du béton (p.ex. en forme de V)
- les mouvements le long des lèvres des fissures
- les venues d'eau dans les fissures
- la coloration des bordures des fissures
- les dépôts dans ou le long des fissures

Tab. 8.4.2:
Types de fissures et
leurs typologies ap-
parentes.

Type de fissure	Typologie apparente	Description
Fissures dans le béton d'enrobage le long de l'armature		Fissures orientées perpendiculairement à la surface, au-dessus de l'armature supérieure. Elles sont souvent disposées en un réseau orthogonal et combinées avec une cavité sous la barre d'armature. Elles peuvent aussi apparaître au passage entre des zones à sections significativement différentes et résultent du tassement du béton frais.
Fissures de surfaces horizontales (fissures en réseau)	Vue de dessus 	Fissures peu profondes, discontinues, disposées irrégulièrement, en escalier, espacées de plusieurs décimètres, à ouverture variable, perpendiculaires à la surface d'éléments de construction horizontaux. En général peu profondes, elles peuvent atteindre des profondeurs de 15 cm. Souvent elles longent le granulat avec un profil en V. Elles sont causées par le retrait précoce.
Fissures de dessiccation	Vue de dessus 	Fissures continues perpendiculaires à la surface avec une ouverture constante. Le cheminement des fissures est déterminé par la géométrie et les contraintes dans l'élément de construction. La cause des fissures est la dessiccation du béton.
Fissures traversantes		Fissures, qui traversent toute la section, elle sont perpendiculaires à la direction de la contrainte d'un élément de construction subissant une traction directe.
Fissures de flexion		Fissures non traversantes, limitées à la zone de traction d'un élément de construction soumis à une flexion, en grande partie perpendiculaires au sens de la portée.
Fissures de cisaillement		Fissures obliques à l'axe d'une poutre (inclinaison env. 45°). Ces fissures traversent, comme les fissures de flexion la zone de traction, et se terminent dans la zone de compression. Leur orientation dépend de la direction des contraintes principales de traction.
Fissures parallèles à la surface (fissures en pelures d'oignon)		Fissures parallèles à la surface. En cas de gel à quelques millimètres, en cas d'attaque de sulfates et de RAG à quelques centimètres de distance de la surface. Elles peuvent aussi se former suite à des différences de température élevées entre le cœur et la bordure de l'élément de construction, induites par la chaleur d'hydratation.

8.4.3 Causes et mesures préventives

Généralités

Les causes principales parmi les nombreuses raisons qui peuvent mener à une fissuration du béton sont résumées dans le tableau 8.4.3:

Cause de la fissuration	Description
Béton frais	
Composition du béton, géométrie, conditions d'environnement	tassement du béton frais, retrait précoce ou capillaire, bétonnage en pente
Béton durci	
Autocontraintes et contraintes imposées	dissipation de la chaleur d'hydratation, retrait de dessiccation, température ou tassement différentiel
Charge	charges permanentes et temporaires
Exposition	attaques du gel ou des sulfates, réaction alcalis-granulats, corrosion de l'armature

Tab. 8.4.3: Causes de la fissuration du béton en rapport avec les sollicitations.

Les fissurations induites par des charges, des gradients de température et un tassement différentiel ne seront pas traités plus en détail (fig. 8.4.2).



Fig. 8.4.2: Fissures de tassement dans une culée de pont (indiquées par des flèches rouges).

Les fissures induites par l'attaque du gel ou des sulfates, par la réaction alcalis-granulats ainsi que par la corrosion de l'armature seront traitées séparément dans les chapitres 8.5 et 8.7 à 8.9.

Tassement du béton frais

Causes

Le tassement du béton frais est provoqué par la sédimentation des particules solides et la remontée simultanée de l'eau à la surface sous l'effet des différences de masse volumique (voir chapitre 8.3). Il se produit avant la prise du

ciment, c.-à-d. juste après la mise en place et le compactage du béton. Dans des cas défavorables, le tassement peut atteindre 1 % de l'épaisseur de l'élément de construction. Puisque le béton au jeune âge ne possède qu'une faible rigidité, il peut se fissurer au-dessus des décalages au niveau de la structure ou au droit des barres d'armature, surtout si l'épaisseur d'enrobage est faible (fig. 8.4.3).

Les fissures formées dans le béton frais peuvent être empêchées par un compactage et un traitement ultérieur. Cette mesure n'est cependant efficace que si elle est réalisée au bon moment, c.-à-d. avant le début de la prise.

Mesures préventives

La fissuration induite par le tassement du béton frais peut être évitée ou limitée par les mesures suivantes:

- le choix d'une consistance du béton frais plus raide
- la diminution de la quantité d'eau de gâchage
- l'augmentation de la teneur en farines et utilisation d'un ciment moulu plus finement, afin d'élever le pouvoir de rétention d'eau et de réduire le ressuage
- le bétonnage des éléments de construction massifs en plusieurs couches frais sur frais ou un bétonnage lent.



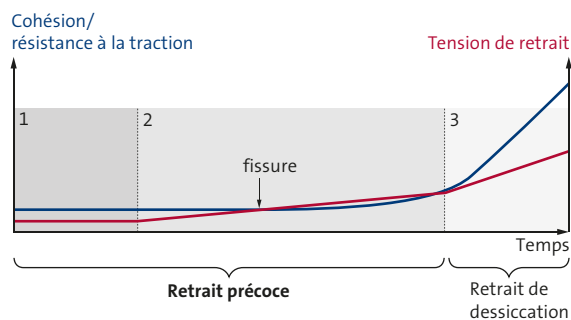
Fig. 8.4.3: Réseau orthogonal de fissures de tassement.



Retrait précoce ou capillaireCauses

Par temps ou vent chaud (foehn), des fissures marquées peuvent apparaître pendant les premières heures après le bétonnage, en particulier dans les éléments de construction horizontaux de grande surface. Ces fissures caractérisées par leur répartition et leur moment de développement typiques (fissures de retrait précoce) sont causées par le retrait précoce ou capillaire avant la prise du béton (voir chapitre 3.9.2). Le développement des fissures peut être décrit en trois phases (fig. 8.4.4):

Fig. 8.4.4:
Evolution de la résistance à la traction du béton et de la tension de retrait.



Phase 1: béton plastique

Phase 2: béton rigidifié

Phase 3: développement de la résistance

Phase 1: béton plastique: Le béton fraîchement mis en place et compacté libère de l'eau par le ressuage. Il apparaît alors à la surface du béton une pellicule d'eau. Cette pellicule d'eau s'amincit par évaporation. Dès que la pellicule d'eau disparaît, c.-à-d. lorsque la surface commence à sécher, les espaces remplis d'eau dans le béton frais commencent également à se vider. Il se crée alors des tensions capillaires, aussi appelées tensions de retrait. Le béton frais se contracte en adoptant une structure plus dense. La perte d'eau s'accompagne d'une diminution de volume par le tassement du béton encore plastique.

Phase 2: béton rigidifié: Les tensions capillaires sont inoffensives tant que le béton reste dans sa phase plastique. En se rigidifiant, la déformabilité plastique du béton se perd et les tensions de retrait peuvent dépasser la résistance à la traction du béton. De grandes fissures, en partie traversantes peuvent apparaître.

Phase 3: béton durci: A la fin de la prise, le développement de la résistance du béton commence, accompagnée du retrait lié à la dessiccation progressive du béton.

Les fissures de retrait précoce se distinguent par leur ouverture, leur profondeur et leur cheminement, comparées aux fissures de retrait de dessiccation. Ces dernières se forment dans le béton durci. Au lieu de se caractériser par un réseau de fissures, elle sont singulières et longues, et se développent souvent à partir des angles et des réservations. En général, les fissures de retrait précoce sont superficielles. Elles peuvent malgré tout présenter des ouvertures de 1 à 2 mm et au pire traverser l'élément de construction (fig. 8.5.4).

Les éléments de construction horizontaux (dalles et radiers) présentent des surfaces exposées à une forte évaporation et sont particulièrement menacés par le retrait précoce ou capillaire. Les fissures représentent non seulement une atteinte à l'esthétique, mais aussi un affaiblissement de la résistance au gel. De plus, la perte d'eau peut affecter une hydratation suffisante du ciment à la surface du béton, lequel subit une diminution de résistance, montre une porosité élevée et une tendance au sablage. Dans des conditions sévères, un tel béton ne possède pas de durabilité suffisante.

Mesures préventives

Plus le taux d'évaporation à la surface est élevé, plus grand le risque de fissuration dû au retrait sera précoce. Ce risque est augmenté par le vent, les températures élevées et une faible humidité relative de l'air. La mesure préventive la plus importante est une cure immédiate et adéquate, telle qu'elle est décrite aux chapitres 3.6 et 4.4. Il est recommandé de réaliser également une cure intermédiaire.



Fig. 8.4.5: Fissure profonde due au retrait précoce dans une carotte en béton.

Dissipation de la chaleur d'hydratation

Causes

Les fissures dues à la dissipation de la chaleur d'hydratation se forment pendant les premiers jours après le bétonnage, dès que les tensions induites par les auto-contraintes et les contraintes imposées dépassent la résistance à la traction du béton (voir fig. 3.9.10).

Les éléments de béton en train de durcir peuvent être entravés dans leur déformation. Ceci dépend du type de construction, du raccord aux éléments de construction préexistants déjà durcis, des dimensions et du déroulement du chantier. Il en résulte un risque de fissuration (tab. 8.4.4). Les fissures dues à la chaleur d'hydratation dissipée sont surtout observées dans des éléments de construction massifs d'une épaisseur supérieure à 50 cm. Pour la plupart des éléments de dalles ou de mur de bâtiment, le risque de ce type de fissuration est négligeable.

Mesures préventives

Les fissures dues à la dissipation de la chaleur d'hydratation peuvent être évitées ou limitées par des mesures de technologie du béton et des mesures supplémentaires.

Mesures liées à la technologie du béton:

Les mesures liées à la technologie du béton visent à réduire la température maximale T_{max} et la différence de température ΔT_{max} (tab. 8.4.4). Il est recommandé de ne pas dépasser une température maximale T_{max} de 60° C et de limiter la différence de température ΔT_{max} à 20 Kelvin.

Mesures à prendre pour la réduction de la température maximale T_{max} :

- l'utilisation d'un ciment à faible chaleur d'hydratation (LH) ou d'une classe de résistance plus basse
- l'utilisation d'un ciment Portland composé ou la substitution du ciment par des additions réactives telle que la cendre volante
- la limitation de la température du béton frais (conservation du granulat à l'ombre et arrosage avec de l'eau, bétonnage tôt le matin)
- le stationnement des camions malaxeurs à l'ombre et arrosage du tambour malaxeur avec de l'eau
- le refroidissement du béton par l'insertion de conduites permettant la circulation d'eau froide (effet sur T_{max} et ΔT_{max} si les serpentins de réfrigération sont disposés au cœur du béton)
- l'abaissement de la température du béton frais dans le camion malaxeur par le refroidissement à l'aide d'azote

	Entrave à la déformation par l'élément lui-même	Entrave à la déformation par des éléments préexistants voisins
Cause	différence max. de la température ΔT_{max} dans la section de l'élément	température maximale du béton T_{max}
Typologie apparente	fissures en pelure d'oignon	fissures de séparation traversantes

Tab. 8.4.4: Entrave à la déformation et fissuration induite par la dissipation de la chaleur d'hydratation.

Mesures de limitation de la différence de température ΔT_{max} :

- éviter le décoffrage du béton au moment du pic de la température, afin d'empêcher un choc thermique (refroidissement rapide de la surface du béton). Ceci est particulièrement important en cas de basses températures de l'environnement immédiat ou d'éléments de construction massifs.
- Utilisation de nattes isolantes. De cette manière, les différences de température dans l'élément de construction diminuent et la baisse de la température est ralentie. Les contraintes surviennent plus tard lorsque la résistance à la traction est déjà plus développée. Il peut être judicieux d'attendre la culmination de la température (1 à 2 jours) avant de poser des nattes isolantes sur des éléments de construction massifs.

Mesures supplémentaires:

Les mesures supplémentaires servent à prévenir la fissuration par une réduction du degré d'entrave à la déformation et de délimiter l'ouverture des fissures si une certaine fissuration est tolérée. Ces mesures sont identiques à celles recommandées pour réduire le retrait et sont traitées plus en détail dans le chapitre suivant «retrait».

Retrait

Causes

Si le retrait endogène et le retrait de dessiccation sont entravés ou si le retrait de dessiccation ne se développe pas de façon régulière sur toute la section de l'élément de construction, des contraintes de traction apparaissent et peuvent conduire à une fissuration (voir chap. 3.9.2). Le développement des fissures dépend fortement de la géométrie et du degré d'entrave de l'élément de construction. L'ouverture et la répartition des fissures sont déterminées par des aspects géométriques et l'armature.

Mesures préventives

Les fissures de retrait peuvent être évitées ou limitées par des mesures de technologie du béton.

8. Dégradations du béton

8.4 Fissures

Mesures de technologie du béton:

- le choix d'une courbe granulométrique continue, afin d'améliorer le degré de compactage et de réduire la demande en eau du granulat
- la réduction de la teneur en eau par l'emploi de fluidifiants
- l'utilisation de produits réducteurs de retrait
- une cure soignée au moment opportun

Mesures supplémentaires:

- éviter des accrochages avec le terrain en prévoyant une couche de glissement p. ex. faite de sable ou d'une feuille doublée (fig. 8.4.6)
- l'absorption des contraintes aux angles saillants et aux ouvertures par une armature supplémentaire (fig. 8.4.7)
- la délimitation de la fissuration à l'aide de joints. La disposition des joints dépend de nombreux facteurs, p. ex. le type de substrat du terrain, les mouvements prévus des éléments de construction, le déroulement du chantier et l'ordre des étapes de bétonnage, le terrain de fondation sous l'élément, l'armature et le développement de la chaleur d'hydratation du béton
- la planification des joints de clavage (fig. 8.4.8 et fig. 8.4.9). Il s'agit d'une mesure très efficace également en cas de dissipation de la chaleur d'hydratation pendant un intervalle de temps de 5 à 15 jours.
- la planification méticuleuse des étapes de bétonnage. Le nombre et les délais entre les différentes étapes de construction doivent être réduits le plus possible, afin de minimiser les déformations de retrait différentielles des étapes voisines qui s'entravent mutuellement.
- la limitation des ouvertures des fissures par la pose d'une armature minimale pour une meilleure répartition des fissures (des fissures fines, mais réparties dans tout l'élément de béton affectent moins la durabilité du béton et sont, en règle générale, mieux tolérées que quelques grandes fissures isolées)

Fig. 8.4.6:
Disposition d'une
couche de glisse-
ment sous une dalle
de radier afin de ré-
duire le frottement
avec le terrain.

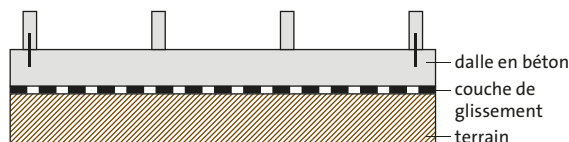


Fig. 8.4.7: Fissuration d'une dalle en béton au pied d'un pilier induite par des contraintes en fond d'entaille (en haut), armature supplémentaire pour prévenir la fissuration (en bas).



Fig. 8.4.8: Joint de clavage durant la construction d'un grand bâtiment.

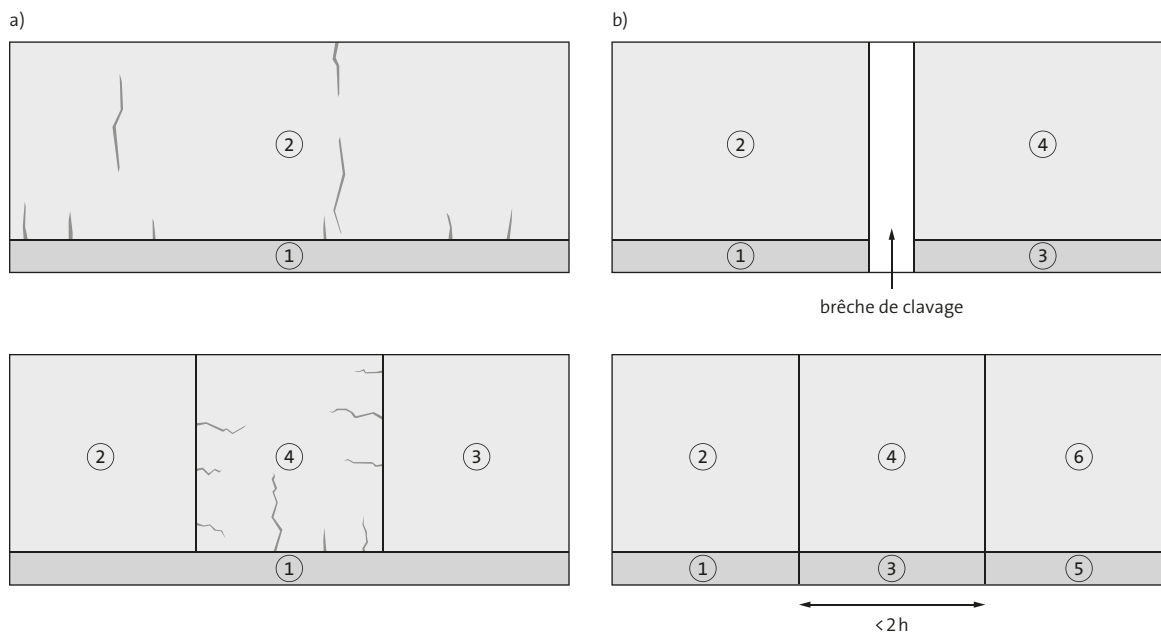


Fig. 8.4.9: Etapes de bétonnage d'un mur de soutènement (élévation)

Risque de fissuration		Efficacité des mesures		
Cause de fissuration	Moment d'apparition	Composition du béton	Cure	Armature
Tassement du béton frais	avant le début de prise	très élevée	néant	néant
Retrait précoce ou capillaire	avant et pendant le début de prise	moyenne	très élevée	néant
Dissipation de la chaleur d'hydratation	après la culmination de la température (3 à 10 jours après le bétonnage)	très élevée	très élevée	moyenne
Retrait de dessiccation	quelques semaines à quelques années après le bétonnage	élevée	élevée	très élevée
Tassement du terrain	pendant la durée de service	néant	néant	très élevée
RAG	normalement au plus tôt après 10 à 15 ans	très élevée	néant	moyenne
Sulfates	pendant la durée de service (selon le béton)	très élevée	moyenne	néant

Tab. 8.4.5: Efficacité des différentes mesures visant à réduire le risque de fissuration.

8.5 Dégradations dues au gel/dégel en l'absence ou en présence de sels de déverglaçage

8.5.1 Introduction

Les dégradations par les attaques de gel/dégel en l'absence ou en présence de sels de déverglaçage affectent non seulement l'apparence, mais également la durabilité du béton d'enrobage. Les dégâts de gel/dégel en l'absence ou en présence de sels de déverglaçage peuvent mener à d'autres dégradations ultérieures, comme p.ex. la corrosion de l'armature, une abrasion et une érosion accrue de la surface du béton.

8.5.2 Typologie apparente

Généralités

Les dégâts de gel/dégel en l'absence ou en présence de sels de déverglaçage apparaissent, en règle générale, durant les premières périodes hivernales après le bétonnage. Elles se présentent sous forme de dégradations superficielles et internes de la microstructure :

- un sablage et un écaillage de la surface du béton
- des décollements ponctuels au-dessus des granulats non résistants au gel, des arêtes cassées et des fissures
- des décollements de grande surface
- des fissures dans la pâte de ciment

Il est possible d'évaluer visuellement les dégradations superficielles. Par contre, les dégradations internes microstructurales sont examinées, p.ex. dans des carottes de forage, par l'analyse microscopique ou à l'aide des mesures du module d'élasticité (perte du module d'élasticité).

Sablage et écaillage de la surface

L'altération superficielle sous forme d'un sablage ou d'un écaillage est le type de dégradation due au gel le plus souvent observé. En combinaison avec des sels de déverglaçage, l'altération s'intensifie considérablement (fig. 8.5.4).

Décollements ponctuels, arêtes cassées

Un décollement ponctuel à la surface, appelé «pop-out», résulte généralement de la présence d'un granulat gélif sous-jacent. Ces granulats sont souvent très poreux et absorbent de l'eau. Les granulats argileux subissent de plus un gonflement. L'altération du granulat provoque un décollement en forme de cratère de la pâte de ciment recouvrant le grain (fig. 8.5.1). Les exigences à l'égard des granulats sont définies dans les normes SN EN 12620 et SN 670 115 (voir chapitre 6.2).

Décollements de grande surface et fissures

Des décollements plus profonds et des fissures conduisent au détachement de granulats et de fragments de pâte de ciment proches de la surface en cas de résistance au gel/sel insuffisante, voire mauvaise, du béton (fig. 8.5.2).

Selon le degré de saturation de la pâte de ciment, les tensions s'y développant conduisent à une microfissuration. Au cours de la dégradation progressive par des cycles répétés de gel/dégel, la saturation en eau et les contraintes résultantes augmentent au fur et à mesure et aggravent l'intensité de l'attaque (voir fig. 8.5.3).

Évaluation visuelle de la résistance au gel et aux sels de déverglaçage

La figure 8.5.4 donne des exemples de résistances au gel et aux sels de déverglaçage variables selon trois catégories – élevée, moyenne et insuffisante – pour des surfaces de béton d'un âge supérieur à 10 ans.

Fig. 8.5.1:
Dégradation sous
forme de «pop-out»
au-dessus d'un gra-
nulat non résistant
au gel.





Fig. 8.5.2: Décollements profonds et de grande surface d'un élément de bordure de trottoir.

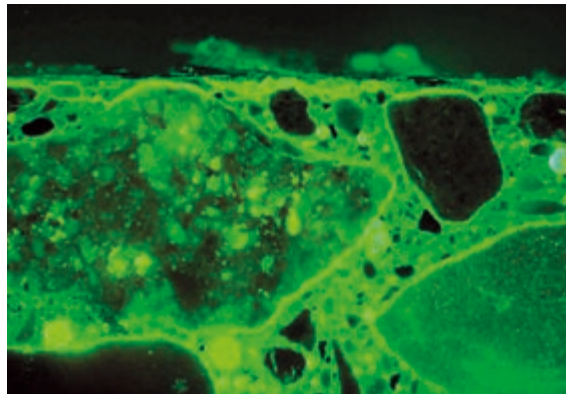


Fig. 8.5.3: Photo microscopique des dégradations microstructurales internes du béton sous forme de fissures de décollement le long des granulats.



Résistance gel/sel élevée:

- sans altération de la peau de ciment
- sans décollements
- sans fissures visibles



Résistance gel/sel moyenne:

- altération de la peau de ciment par un léger sablage et écaillage de la surface
- sans décollements
- sans fissures visibles



Résistance gel/sel insuffisante:

- peau de ciment complètement érodée
- décollements et arêtes cassées
- fissures visibles

Fig. 8.5.4: Exemples de résistances variables au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage pour des surfaces de béton d'un âge supérieur à 10 ans.

8.5.3 Causes et mesures préventives

Attaque par le gel

Pendant la transformation, sous l'effet du gel, de l'eau en glace dans la pâte de ciment poreuse, différents phénomènes ayant une influence décisive sur la résistance au gel se produisent:

- augmentation du volume de l'eau
- abaissement du point de congélation de l'eau dans les petits pores
- processus de diffusion de l'eau dans la pâte de ciment poreuse

Tous ces processus dépendent du type et de la quantité des pores, respectivement de la distribution des diamètres de pores. La dégradation du béton par le gel est caractérisée par des mécanismes de destruction complexes.

Augmentation du volume de l'eau

La transition de phase entre l'eau et la glace s'accompagne d'une augmentation volumique de 9 % à cause de l'anomalie de masse volumique spécifique à l'eau. Si le système

de pores contenus dans la pâte de ciment n'offre pas assez d'espace d'expansion volumique sous forme de pores accessibles et vides, une contrainte interne de compression se crée. Cette contrainte provoque la fissuration du béton dès que sa résistance à la traction est dépassée (fig. 8.5.5).

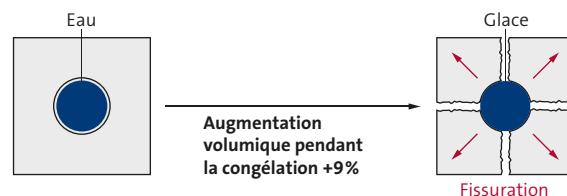


Fig. 8.5.5: Effet de l'augmentation de volume lors de la congélation de l'eau.

8. Dégradations du béton

8.5 Dégradations dues au gel/dégel en l'absence ou en présence de sels de déverglaçage

Tab. 8.5.1:
Degré de saturation
des pores et point
de congélation de
la solution intersti-
tielle des pores en
fonction du type de
pores.

Type de pore	Diamètre de pore	Degré de saturation des pores*	Point de congélation
Pores de compactage	> 1 mm	vides	—
Pores d'air entraînés artificiellement	30 µm à 300 µm	vides ne se remplissent pas par absorption capillaire	—
Pores capillaires	30 nm à 30 µm	partiellement remplis par condensation et pratiquement complètement remplis par absorption capillaire	0 à -20° C
Pores de gel	< 30 nm	complètement remplis par condensation	-20° C à -90° C

* état sous des conditions réalistes, c.-à-d. une humidité relative de l'air de 50–98 %.

Abaissement du point de congélation dans les petits pores

Si le béton était complètement saturé en eau, sa structure devrait être détruite lors du premier cycle de gel. Cependant l'expérience pratique montre que les bétons d'une qualité suffisante ne montrent des dégradations qu'après de nombreux cycles de gel/dégel, même s'ils ont été saturés en eau auparavant. On observe dans le béton aucune congélation subite ou congélation omniprésente et simultanée. Le degré de saturation des pores et le point de congélation de l'eau contenue dans les pores dépendent du diamètre des pores. Lorsque le diamètre des pores diminue, leur degré de saturation augmente et le point de congélation de la solution des pores s'abaisse (tab. 8.5.1). De ce fait, l'eau dans les pores capillaires se congèle d'abord, tandis qu'elle reste à l'état liquide dans les pores de gel.

Effet de pompage

Les cycles de gel-dégel répétés donnent naissance à un effet de pompage qui mène à une saturation progressive du béton. L'eau gèle d'abord dans les plus grands pores. La pression de vapeur étant plus grande au-dessus de l'eau qu'au-dessus de la glace, l'eau encore à l'état liquide migre des pores capillaires vers les plus grands pores où elle gèle. On assiste donc à une vidange des pores capillaires et une accumulation de glace dans les plus grands pores.

Au moment de la fonte, la glace fond d'abord à la surface du béton, tandis qu'au cœur du béton le volume des pores est encore congelé. La zone de bordure du béton se dilate en se réchauffant et absorbe l'eau de fonte par les pores capillaires vides. Au cycle de gel suivant le processus recommence.

Attaque par le gel en présence de sels de déverglaçage

Les sels de déverglaçage qui pénètrent dans le béton abaissent le point de congélation de la solution interstitielle des pores de telle manière que l'eau gèle à des températures nettement inférieures à 0° C.

Les sels de déverglaçage sont hygroscopiques, c.-à-d. qu'ils absorbent l'humidité de l'air. Le degré de saturation du béton chargé en sels augmente et renforce, dans la zone superficielle du béton, le risque de dégradation.

L'emploi des sels de déverglaçage intensifie les mécanismes de dégradations physiques du gel par les phénomènes suivants:

- congélation par couches
- choc thermique



Fig. 8.5.6: Le parapet supportant le racloir d'un bassin d'une station d'épuration est fortement exposé aux attaques par le gel/dégel en présence de sels de déverglaçage.

Congélation par couches

Les sels de déverglaçage sont transportés sous l'effet des intempéries (lessivage et saturation) vers l'intérieur du béton. Les concentrations de sels sont souvent plus basses en surface que dans des zones plus profondes du béton. On observe à environ 10–20 mm de profondeur une concentration maximale en sels. Dans cette zone, la température de congélation de la solution interstitielle des pores riches en sels est clairement plus basse qu'en surface du béton (0–10 mm).

Si la température du béton tombe en dessous de zéro degré, la solution interstitielle des pores proches de la surface gèle en premier, suivie de celle des zones profondes (20–30 mm). Par contre la couche intermédiaire, avec la plus haute concentration de sels, ne gèle qu'en dernier.

Pour cette raison, la solution interstitielle des pores de cette couche intermédiaire ne peut plus s'échapper au moment de la congélation vers des zones voisines déjà gelées et des contraintes de compression induites par le gel se créent. Il en résulte une fissuration parallèle à la surface, engendrant des décollements superficiels (fig. 8.5.7).

Choc thermique

Le choc thermique survient quand la surface de béton congelée est traitée aux sels de déverglaçage. La chaleur de fusion de la glace est soutirée au béton sous-jacent, de manière à provoquer une chute des températures dans la zone proche de la surface du béton. La baisse subite de la température peut atteindre p. ex. jusqu'à 14 Kelvin en 1 à 2 minutes, et induit des autocontraintes dans la structure du béton, qui dépassent la résistance à la traction du béton.

Dommages créés par d'autres agents de déverglaçage

Le recours aux acétates et formiates (agents dégivrants) provoque une montée brusque du pH de la solution interstitielle des pores. Il en résulte une attaque de la pâte de ciment et du granulat analogue à une réaction alcalis-granulats.

Mesures préventives

Les dégradations dues au gel et aux sels de déverglaçage sont évitées au moyen des mesures liées à la technologie du béton et éventuellement des mesures supplémentaires (voir chapitre 6.2).

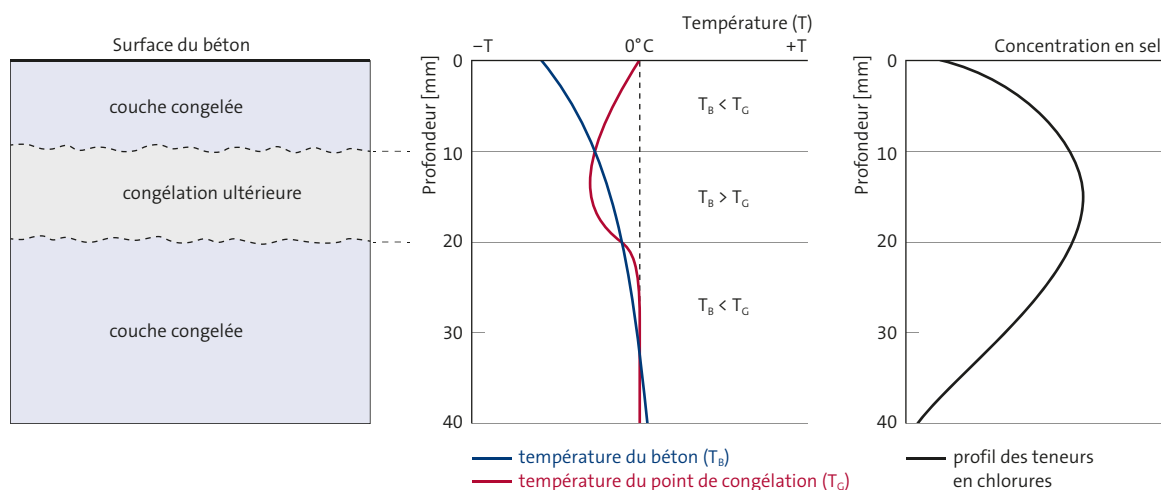


Fig. 8.5.7: Congélation par couches du béton sous l'effet des sels de déverglaçage.

8.6 Dégradations dues aux attaques chimiques dissolvantes

8.6.1 Introduction

Une attaque chimique dissolvante intervient sous l'effet d'acides, de sels échangeurs d'ions, d'eau douce ou de bases fortes (tab. 8.6.1). L'attaque dissolvante progresse de la surface vers l'intérieur du béton. Les composants de la pâte de ciment et parfois du granulat sont dissouts par des substances pénétrantes puis lessivés (fig. 8.6.1). Dans la littérature, on retrouve souvent le terme de corrosion du béton pour désigner l'attaque chimique dissolvante.

Fig. 8.6.1:
Attaque chimique
dissolvante d'un
prisme de mortier.



Le degré d'attaque dépend du type, de la concentration et de la quantité des fluides chimiquement agressifs et de la solubilité, notamment du taux de lessivage des sels produits dans le béton. L'évolution des dégradations dépend donc de la porosité du béton qui détermine l'infiltration des fluides agressifs et le lessivage de la pâte de ciment. Le degré d'attaque est aussi influencé par la température et la vitesse d'écoulement des solutions agressives.

8.6.2 Typologie apparente

Les dégradations par une attaque chimique dissolvante se caractérisent normalement par une érosion de la surface du béton (fig. 8.6.2 et 8.6.3).



Fig. 8.6.2: Erosion de la surface du béton d'un bassin de station d'épuration.

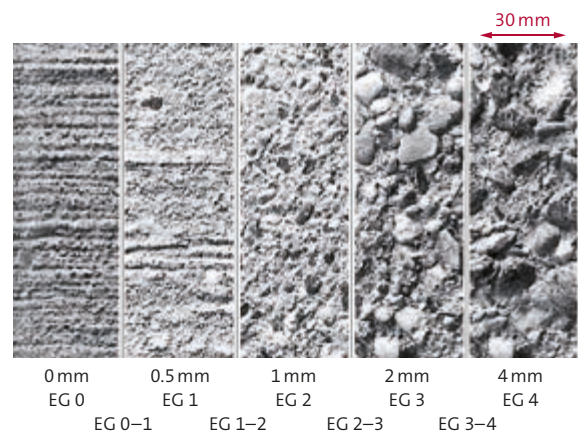


Fig. 8.6.3: Attaque de la surface d'un bassin de décantation.
(Source: Betonsuisse Marketing AG, Bern).

Tab. 8.6.1:
Aperçu des types
d'attaques
chimiques dissol-
vantes.

Type d'attaque	Substance agressive pour le béton	Provenance	Effet
Acides organiques et minéraux faibles	acides organiques: acide tannique, acide acétique, acide lactique, acides gras, acide formique, acide humique, phénols	industrie, industrie alimentaire, agriculture, sols, tourbières huiles lourdes et moyennement lourdes issues de la distillation des composés bitumineux	dissolution des composés calciques de la pâte de ciment
	éthanol	biocarburants	
	acides minéraux: gaz carbonique, acide sulfureux	industrie, eaux phréatiques, pluie acide, canalisations	
Acides minéraux forts	acide chlorhydrique, acide sulfurique, acide nitrique	industrie, agriculture (ensilage)	dissolution de tous les composants de la pâte de ciment et des carbonates dans le granulats
Acides biogènes	acides aminés	champignons, lichens, algues	saponification de l'hydroxyde calcium de la pâte de ciment
	produits métaboliques (acides forts)	bactéries dans les eaux usées, canalisations, stations d'épuration	dissolution de tous les composants de la pâte de ciment et des carbonates dans le granulats
Sels échangeurs d'ions	solutions de sels de magnésium et d'ammonium	eaux phréatiques minéralisées, industrie, agriculture, stations d'épuration	réaction avec l'hydroxyde de calcium et formation de sels de calcium très solubles
Eaux douces	eau < 7° fH (degrés français)	eaux de pluie, eaux de surface, eaux de fonte	dissolution et lessivage des composés calciques de la pâte de ciment
Bases fortes	solutions concentrées de bases fortes (potasse et soude caustique)	industrie chimique	dissolution des aluminates dans la pâte de ciment et des silicates et de la silice dans le granulats
	acétate, formiate	dégivants pour avions	

8.6.3 Causes et mesures préventives

Acides

L'attaque par des acides conduit à la dissolution des phases hydratées de la pâte de ciment et engendre la formation de sels solubles de Ca, Al et Fe ainsi que la dissolution de la silice. Le degré d'agressivité dépend de la concentration de l'acide mais surtout de la valeur du pH. L'attaque touche surtout la pâte de ciment, mais, lors d'une attaque par un acide fort, le granulats soluble à l'acide est aussi dissout.

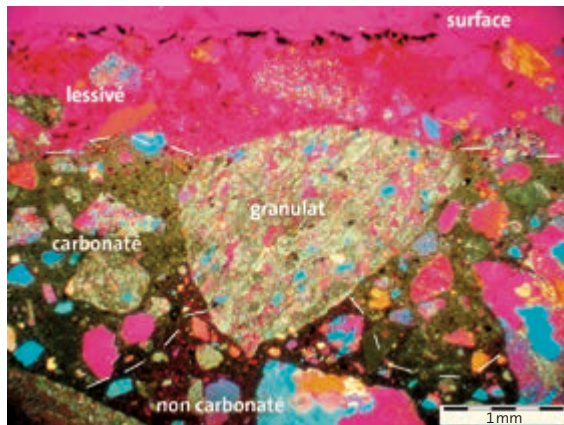
Les phases hydratées de la pâte de ciment sont dissoutes au contact des acides et il se forme une zone de lixiviation, d'où les produits de la dissolution (sels solubles de Ca, Al et Fe) sont lessivés et emportés. Un gel siliceux

amorphe reste comme résidu insoluble. Ces résidus insolubles créent une pellicule de protection à la surface du béton empêchant que la solution agressive, qui doit diffuser à travers cette couche de gel protectrice, n'entre en contact direct avec le béton encore intact. Derrière celle-ci se trouve la zone de lixiviation, caractérisée par un appauvrissement en hydroxyde de calcium, c.-à-d. par une plus faible valeur pH de la solution interstitielle des pores que celle du béton encore intact. Le front de réaction proprement dit se situe dans la zone de lixiviation entre la couche de gel et le béton intact. Avec le temps, le processus se ralentit parce que la couche de protection devient plus épaisse. Si la couche protectrice est détruite ou enlevée par un nettoyage, le front d'attaque pénètre alors plus profondément dans le béton.

8. Dégradations du béton

8.6 Dégradations dues aux attaques chimiques dissolvantes

Fig. 8.6.4:
Photo microscopique d'une couche protectrice de résidus amorphes insolubles à la surface du béton.



Gaz carbonique

Le gaz carbonique est un acide faible que l'on rencontre dans les eaux de montagne et la nappe phréatique. L'agressivité des eaux contenant du gaz carbonique dépend en partie de la valeur du pH et principalement de leur composition. Dans l'eau règne un équilibre entre le carbonate d'hydrogène de calcium (bicarbonate de calcium) et le gaz carbonique dit d'équilibre, nécessaire au maintien en solution des carbonates. La part libre de gaz carbonique, c.-à-d. qui n'est pas nécessaire pour équilibrer le bicarbonate, est appelée gaz carbonique agressif car elle est capable de dissoudre plus de calcaire.

L'équilibre entre le gaz carbonique et des bicarbonates est régi par la teneur en gaz carbonique libre, la température, la dureté de l'eau ainsi que la concentration en ions d'hydrogène et en autres ions. L'eau dure a besoin d'une teneur plus élevée en gaz carbonique pour avoir un effet dissolvant vis-à-vis du calcaire. De ce fait, le risque d'une attaque par gaz carbonique agressif est plus important dans le cas des eaux douces.

Acides biogènes

Pour se développer, les microorganismes ont besoin de substances organiques et inorganiques de compositions variables et, selon le type, de certaines conditions de pH. L'énergie nécessaire à la vie vient de la lumière du soleil, des substances organiques et des composés inorganiques oxydables ou réductibles. La plupart des microorganismes produisent, par leur métabolisme, des acides organiques ou inorganiques qui peuvent attaquer la pâte de ciment.

Dans les bassins d'activation biologique des stations d'épuration communales se développe sur les murs en béton une couche gélatineuse bactérienne (biofilm). Selon la teneur en oxygène de l'air, la composition de l'eau usée et les processus de dénitrification, des valeurs de pH très basses peuvent s'installer par la nitrification dans ce biofilm. Ceci conduit à une attaque acide de la surface du béton.

Acide sulfurique biogène

L'acide sulfhydrique (H_2S) peut se former, p. ex. au-dessus des eaux usées dans les canalisations ou dans le compartiment de gaz des installations de production de biogaz, par décomposition bactérienne des protéines en l'absence d'oxygène. Si celui-ci n'est pas évacué par ventilation, il se condense sur les surfaces froides et peut se transformer sous l'action des microorganismes en acide sulfurique, fortement agressif.

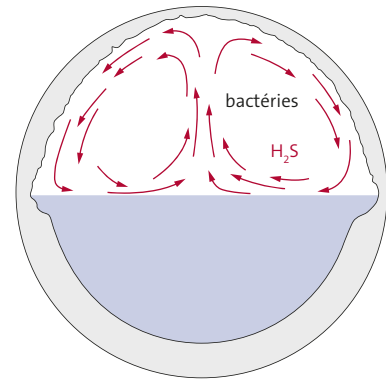
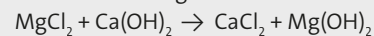


Fig. 8.6.5: Corrosion d'un tube de canalisation par attaque d'acide sulfurique biogène.

Sels échangeurs d'ions

Les solutions aqueuses de sels de magnésium et d'ammonium (à l'exception des carbonates hydrogènes, des oxalates et des fluorures de magnésium et d'ammonium) ont un effet dissolvant sur le béton. Le calcium de l'hydroxyde de calcium de la pâte de ciment est échangé avec les ions magnésium ou ammonium de façon à ce qu'il se forme un sel de calcium très facilement soluble qui peut être lessivé hors du béton.

Chlorures de magnésium

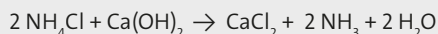


chlorure de magnésium + hydroxyde de calcium
→ chlorure de calcium + hydroxyde de magnésium

Eq. 8.6.1

L'hydroxyde de magnésium forme une masse gélatineuse et molle qui constitue une couche protectrice contre une attaque continue. Elle est efficace tant qu'elle n'est pas enlevée par l'eau courante.

Chlorures d'ammonium



chlorure d'ammonium + hydroxyde de calcium
→ chlorure de calcium + ammoniac + eau

Eq. 8.6.2

Les sels d'ammonium se décomposent en ammoniac volatile dans un milieu alcalin et aucune couche protectrice ne peut donc se former. L'attaque continue de manière inchangée.

Eaux douces

Les eaux de fonte, de pluie, de surface et de source ne contiennent que peu de sels de calcium et de magnésium dissouts. Les eaux dites douces, d'une dureté plus faible que 7° fH, sont peu ou faiblement minéralisées. Elles sont capables de dissoudre de l'hydroxyde de calcium et des alcalins de la pâte de ciment. D'autres ions présents dans l'eau peuvent influencer la vitesse de dissolution de l'hydroxyde de calcium. Les composés alcalins de la pâte de ciment ne sont stables qu'à des valeurs du pH > 12.5 et peuvent se décomposer à un niveau de pH entre 7–12. L'hydroxyde de calcium, présent dans le béton comme produit d'hydratation du ciment sous forme solide ou dissoute, est lessivé par de l'eau douce. Simultanément, l'hydratation du ciment avance et il se forme de nouveau de l'hydroxyde de calcium. Dès que le ciment est complètement hydraté et qu'il ne peut plus se former d'hydroxyde de calcium, la valeur du pH descend en dessous de 12.5. Les phases hydratées du ciment deviennent alors instables et se décomposent. Sous une action continue d'eau douce, la pâte de ciment est lessivée.

Bases fortes

La pâte de ciment n'est pas attaquée par des solutions basiques en faible concentration. Par contre, les bases fortes, en haute concentration, comme p.ex. la soude caustique (> 10 %) ou la potasse caustique (> 20 %) dissolvent les aluminates de la pâte de ciment. Les solutions concentrées de bases fortes peuvent aussi attaquer des granulats silicatés ou siliceux.

Mesures préventives

Les dégradations dues aux attaques chimiques dissolvantes peuvent être empêchées par des mesures de la technologie du béton, renforcées le cas échéant par des mesures supplémentaires (voir chapitre 6.3).

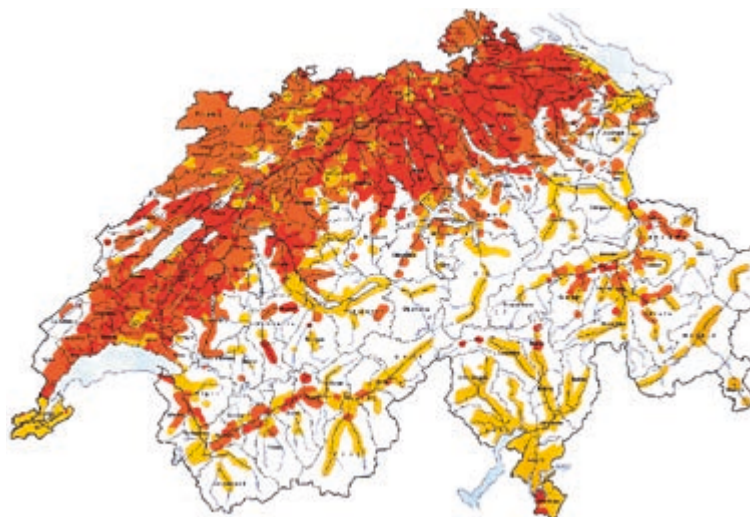


Fig. 8.6.6: Carte des degrés de dureté de l'eau en Suisse. Echelle: blanc: 0–15° fH, jaune: 15–25° fH, rouge: > 25° fH.
(Source: www.trinkwasser.ch).



Fig. 8.6.7: Vue de l'intérieur d'un réservoir d'eau potable.

8.7 Dégradations dues aux attaques par des sulfates

8.7.1 Introduction

L'attaque du béton par des sulfates du béton est un phénomène complexe, mettant en jeu des processus autant chimiques que physiques. Elle peut avoir un effet gonflant ou dissolvant. L'attaque gonflante des sulfates provoque une expansion du béton (fig. 8.7.1).

Selon l'origine des sulfates, on distingue les attaques de sulfates internes des attaques externes (tab. 8.7.1).

Fig. 8.7.1:
Expansion d'une éprouvette par attaque gonflante de sulfates.



Tab. 8.7.1:
Aperçu des différentes formes d'attaques du béton par des sulfates.

Type d'attaque	Substance nocive pour le béton	Occurrence	Effet de l'attaque
Attaque par des sulfates externes, gonflante	solutions de sulfates	nappe phréatique, sols	réaction des sulfates dissous avec les phases C ₃ A de la pâte de ciment, formant de l'ettringite, accompagnée d'une augmentation volumique, et d'autres phases de sulfates
Attaque par des sulfates externes, dissolvante	solutions de sulfates	nappe phréatique, sols	réaction des sulfates dissous avec les phases CSH de la pâte de ciment, formant de la thaumasite, accompagnée d'un effet dissolvant
Attaque par des sulfates internes, gonflante	sulfates, sulfures (gypse, anhydrite, pyrite, pyrrhotine)	granulat, impuretés dans le granulat ou eau de gâchage	réaction des sulfates dissous avec les phases C ₃ A de la pâte de ciment, formant de l'ettringite, accompagnée d'une augmentation volumique
	phases minérales sulfatées dans la pâte de ciment	béton exposé à de hautes températures pendant le durcissement (chaleur d'hydratation élevée, traitement thermique)	transformation du monosulfate et -carbonate en ettringite dans la pâte de ciment durcie, accompagnée d'une augmentation volumique

8.7.2 Typologie apparente

Les attaques par des sulfates produisent les dégradations typiques suivantes:

- précipitation de sulfates et sablage de la surface
- fissuration et décollements de la surface
- fissures dans la masse de la structure du béton
- destruction complète du béton

Précipitation de sulfates et sablage de la surface

Les solutions de sulfates pénétrant depuis l'extérieur jusqu'au cœur du béton réagissent avec la pâte de ciment. La formation des sulfates s'accompagne d'une pression de cristallisation qui mène à un éclatement de la microstructure. A la surface du béton, ceci se traduit par un écaillage et un sablage accompagnés d'efflorescences et de colorations blanchâtres ou jaune-brunâtres (fig. 8.7.2).

Fissuration et décollements de la surface

L'avancement de la dégradation est lié à une fissuration progressive de la surface du béton. Le front de réaction migre au cours du temps profondément vers l'intérieur du béton. Il en résulte une fissuration caractéristique en réseau et en pelure d'oignon, provoquant des éclatements du béton (fig. 8.7.3).

Fissures au sein de la structure du béton

La formation d'ettringite crée à une expansion de la pâte de ciment, qui se décolle du granulats. La structure du béton montre un réseau caractéristique de fissures et de décollements qui détruit complètement le béton (fig. 8.7.4).

Destruction complète du béton

La formation de thaumasite, créée principalement sous de basses températures, s'accompagne d'une transformation de la pâte de ciment durcie en une masse molle semblable à une «purée» très friable (fig. 8.7.5).



Fig. 8.7.2:
Colorations et sablage de la surface du béton.



Fig. 8.7.3:
Fissures et éclatements en surface du béton.



Fig. 8.7.4:
Fissures de décollement entre la pâte de ciment et le granulats.



Fig. 8.7.5:
Destruction complète du béton d'un pieu déterré.

8. Dégradations du béton

8.7 Dégradations dues aux attaques par des sulfates

8.7.3 Causes et mesures préventives

Attaque par des sulfates externes

Dans le cas d'une attaque par des sulfates externes, les sulfates peuvent provenir de différentes sources, comme p.ex. de la nappe phréatique et des sols. Les dégâts de sulfates résultants sont très variables dans leur développement et sont classés en trois types de réaction:

- la formation d'ettringite secondaire
- la formation de gypse
- la formation de thaumasite

Formation d'ettringite secondaire

Au contraire de la formation d'ettringite primaire, inoffensive, qui a lieu pendant le durcissement du béton frais, la cristallisation d'ettringite secondaire a un effet de dégradation. Elle correspond à la réaction des phases d'aluminates de la pâte de ciment durcie, comme p.ex. C_3A , C_4AF , monosulfate et -carbonate avec les infiltrations de solutions de sulfates dans le béton. La cristallisation de l'ettringite s'accompagne d'une augmentation du volume correspondant à 8 fois le volume des phases originales de la réaction. La réaction conduit donc, dans un premier temps, à une densification de la microstructure du béton et à une montée de la résistance à la compression. Ensuite, la pression de cristallisation provoque une fissuration du béton. Les facteurs importants contribuant à la formation d'ettringite secondaire lors d'une attaque par des sulfates externes sont:

- un degré différent d'attaque des ions de sulfates, dans l'ordre décroissant: $MgSO_4$, Na_2SO_4 , K_2SO_4 , $CaSO_4$
- la résistance aux sulfates diminue lorsque la teneur en C_3A du clinker de ciment Portland augmente
- une porosité capillaire élevée du béton favorise l'infiltration des solutions de sulfates et affaiblit sa résistance aux sulfates

Formation de gypse

Une autre réaction expansive due aux sulfates est celle du gypse qui se développe dans le béton lorsque les concentrations en sulfates sont très élevées. Dans ce type de réaction à effet gonflant, l'hydroxyde de calcium de la pâte de ciment réagit avec les ions sulfates de la solution s'infiltrant dans le béton, et forme du gypse. L'occurrence de la cristallisation expansive du gypse est favorisée par les facteurs suivants:

- une solution à haute concentration en sulfates
- un apport continu de solutions aqueuses de sulfates même en faible concentration
- des ciments à haute teneur en clinker

Si des solutions de sulfates de magnésium pénètrent dans le béton, il se forme en plus du gypse et de l'ettringite secondaire, de la brucite ($Mg(OH)_2$). La cristallisation de la brucite renforce l'effet gonflant de l'attaque des sulfates. En outre, elle provoque une baisse de la valeur du pH de manière à déstabiliser les phases CSH de la pâte de ciment. De ce fait, l'effet gonflant peut être renforcé par une attaque chimique dissolvante.

Formation de Thaumasite

La thaumasite est un composé de sulfate, carbonate et silicate de calcium hydraté ($CaSiO_3 \cdot CaSO_4 \cdot CaCO_3 \cdot 15 H_2O$) qui se forme par réaction des ions sulfates avec les phases CSH de la pâte de ciment en présence de carbonates de calcium (granulat, filler calcaire, pâte de ciment carbonatée) et le silicate de calcium (pâte de ciment). Au contraire de la formation de l'ettringite ou du gypse, la réaction n'est accompagnée que d'un faible gonflement et mène surtout à la transformation du béton en une sorte de masse ramollie. Les facteurs importants qui favorisent l'apparition de la thaumasite sont:

- des températures le plus souvent inférieures à $15^\circ C$, de préférence entre environ $5-8^\circ C$
- un apport continu de solutions aqueuses de sulfates même en faible concentration
- la présence de carbonates de calcium
- la présence de silicates de calcium

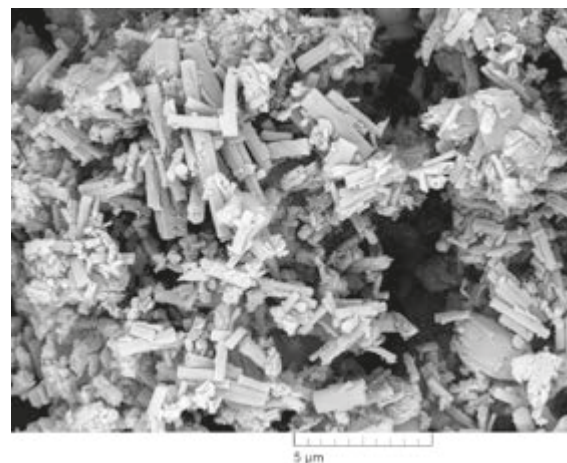


Fig. 8.7.6: Photo prise par microscopie électronique d'un échantillon de béton ayant subi une dégradation par de la thaumasite. La pâte de ciment est détruite et est devenue poreuse («trous» sombres). Elle est remplacée en partie par des cristaux de thaumasite (reconnaissable par sa cristallisation en aiguilles claires). La destruction de la pâte de ciment conduit à la perte de la résistance du béton.

Attaque par des sulfates internes

Une attaque par des sulfates internes survient lorsque des sulfates sont déjà présents dans les composants du béton. Les constituants contenant des sulfates les plus fréquents sont les composés soufrés dans le granulats (anhydrite, gypse, pyrite) et le granulats de gravats mixtes contenant du plâtre ou une eau de gâchage à forte concentration en sulfates. La réaction est identique à celle décrite pour l'attaque par des sulfates externes.

Formation retardée d'ettringite

La formation retardée d'ettringite intervient surtout dans des bétons d'éléments préfabriqués, qui ont été soumis à un traitement thermique entre 60–80° C, ou dans des éléments massifs de béton d'une épaisseur supérieure à 80 cm. Sous des températures élevées (> 60° C) pendant le durcissement du béton, il se forme surtout des monosulfates et -carbonates au lieu de l'ettringite. Dès que le béton est humidifié ultérieurement, ces monophases peuvent réagir de manière différée avec les sulfates disponibles dans la pâte de ciment et former de l'ettringite. Les fissures de décollement le long des bordures du granulats sont caractéristiques de la formation retardée de l'ettringite. L'ouverture des fissures augmente avec le diamètre du granulats (fig. 8.7.7 et 8.7.8).

Mesures préventives

Les dégâts par des sulfates peuvent être évités par des mesures de technologie du béton et le cas échéant des mesures supplémentaires (voir chapitre 6.3). Pour la prévention de la formation retardée d'ettringite, il faut veiller à limiter le développement de la chaleur dans le béton en voie de durcissement.

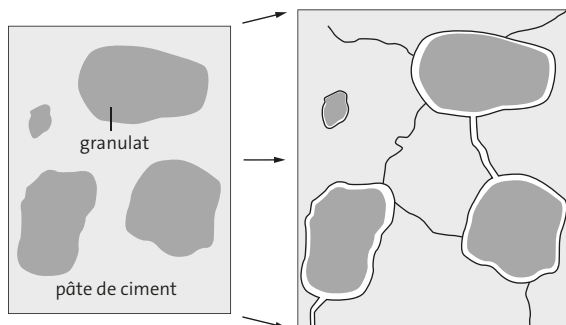


Fig. 8.7.7: Fissuration typique par formation retardée d'ettringite.



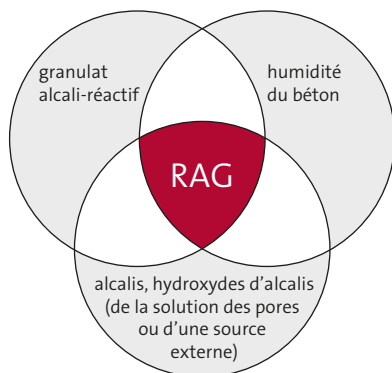
Fig. 8.7.8: Dalle en béton fissurée suite à une formation retardée d'ettringite.

8.8 Dégradations dues à la réaction alcalis-granulats

8.8.1 Introduction

On désigne par Réaction-Alcalis-Granulats (RAG) la réaction du granulat avec les alcalis de la solution interstitielle des pores du béton. Les conditions requises pour cette réaction sont la combinaison d'un granulat sensible aux alcalis, une teneur en alcalis suffisamment élevée et une humidité suffisante dans le béton (fig. 8.8.1).

Fig. 8.8.1:
Conditions requises
pour la réaction
alcalis-granulats.



Granulats alcalis-réactifs

En Suisse, les roches qui se sont avérées le plus fréquemment réactives, sont des calcaires siliceux, calcaires gréseux, grès, grauweekes, gneiss, mylonites, quartzites et schistes. Ces types de roches se rencontrent presque dans tous les granulats suisses, en proportions variables.

Alcalis

Les alcalis (sodium et potassium) de la solution interstitielle des pores du béton proviennent avant tout du ciment et des additions. De manière simplifiée, la teneur en alcalis est exprimée en Na_2O équivalent ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 1\%$ en masse $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\%$ en masse K_2O). Les alcalis participant à la réaction sont appelés alcalis actifs.

Les alcalis dans les bétons contenant des granulats cristallins altérés peuvent aussi provenir p.ex. des feldspaths ou des micas. Les alcalis peuvent également être amenés de l'extérieur par les sels de déverglaçage, la nappe phréatique ou les eaux de montagne. L'apport dépend des conditions de l'environnement, mais aussi de la perméabilité du béton.

Humidité

Le développement de la RAG dépend surtout des conditions d'humidité régnant dans l'ouvrage. Elle progresse tant qu'une humidité minimale et une teneur en alcalis suffisante sont présentes. L'humidité minimale nécessaire dépend de la teneur en alcalis de la solution interstitielle des pores et se situe à environ 70–80 % d'humidité relative dans le béton. Dans les ouvrages massifs en béton (épaisseurs > 50–60 cm), qui ne sèchent jamais complètement, l'humidité propre est suffisamment élevée pour induire le développement de la RAG.

Les infiltrations d'eau dans le béton, accentuées par des fissures induites par des déformations de retrait entravées, le gel ou la corrosion favorisent le développement de la RAG dans le béton.

8.8.2 Typologie apparente

Dégradations visibles en surface

En général, on observe sur l'ouvrage des fissures en réseau caractéristiques, accompagnées d'efflorescences blanches ou sombres (fig. 8.8.2). La surface du béton est parfois colorée en rose et les fissures sont bordées de liserés brun-jaune à gris sombre. Sur les surfaces cassées, les granulats réactifs affichent des bordures de réaction sombres (fig. 8.8.3).

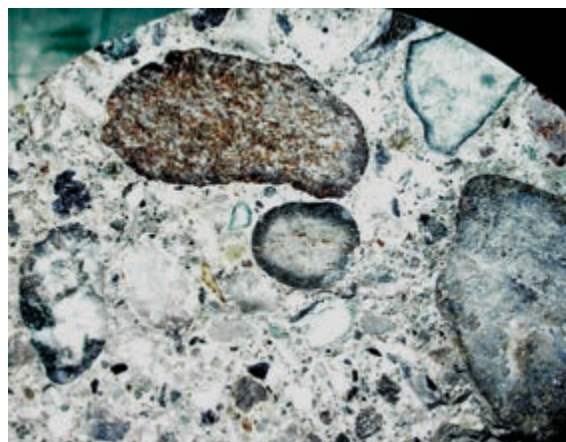


Fig. 8.8.3: Bordures de réaction sombres des granulats réactifs visibles sur une surface cassée d'une carotte de béton.



Fig. 8.8.2: Fissures en réseau dues à la RAG: coloration rose de la surface du béton, efflorescences sombres (à gauche), efflorescences calcaires blanches, liserés brun-jaune (à droite).



Développement des fissures

Des fissures parallèles à la surface apparaissent avec la progression des dégradations à différentes profondeurs, souvent au niveau de l'armature (fig. 8.8.4). Il n'y a pas de corrélation entre la fissuration visible à la surface (ouverture, profondeur) et l'étendue des fissures parallèles à la surface dans la section de l'élément de construction. Il n'est donc pas possible de conclure, à partir des dégradations observées en surface, sur un état du béton au cœur ou à la face arrière d'un élément de construction.

La RAG peut conduire à une destruction progressive du béton en donnant naissance à un réseau de fissures serrées, de grande ouverture et avec des déplacements latéraux (fig. 8.8.5).

La RAG produit une distribution hétérogène des désordres dans l'élément de construction. Outre les pertes de résistances mécaniques, il résulte un risque accru de dégâts dus au gel ou à la corrosion (fig. 8.8.6). L'aptitude au service peut être affectée, si des déformations entravent le fonctionnement.



Fig. 8.8.4: Formation d'une fissure parallèle à la surface du parement, observée sur un mur de soutènement armé.



Fig. 8.8.5: Destruction du béton par la RAG: réseau de fissures à mailles serrées, à grande ouverture et avec déplacements latéraux.



Fig. 8.8.6: Dégâts de gel suite à la dégradation du béton par la RAG.

8. Dégradations du béton

8.8 Dégradations dues à la réaction alcalis-granulats

8.8.3 Causes et mesures préventives

La vitesse avec laquelle un dégât de RAG se développe est variable et est influencée par la qualité du béton, le granulats, l'exposition de l'élément d'ouvrage (surtout l'humidité, les cycles de température), l'armature, etc.

Plus la teneur en alcalis de la solution interstitielle des pores du béton est élevée, plus la teneur en ions hydroxydes (valeur de pH) sera élevée. Les ions hydroxydes attaquent la silice contenue dans le granulats pour former un gel hydraté de silicates d'alcalis et de calcium, appelé en général brièvement «gel» (fig. 8.8.7).

La solubilité de la silice dépend de sa structure cristalline: la silice amorphe (p. ex. opale, silex, silicifications des calcaires et des grès) est plus facilement soluble que la silice à structure cristalline (quartz) plus ou moins ordonnée (p. ex. dans les gneiss et grès). Il existe différents types de roches alcalis-réactives pour lesquelles l'étendue des dégâts et la vitesse de développement de la réaction varient. Les granulats suisses appartiennent en règle générale aux granulats réagissant lentement.

Le gel peut absorber de grandes quantités d'eau, produisant ainsi une pression d'expansion. Dès que celle-ci dépasse la résistance à la traction du granulats, des fissures se créent dans le béton à partir du granulats. En surface, des fissures caractéristiques apparaissent en réseau. La fissuration affectant le granulats et la pâte de ciment affaiblit fortement la structure du béton et mène à de grandes pertes au niveau des résistances mécaniques (fig. 8.8.8).

Mesures préventives

Les dégâts dus à la RAG peuvent être évités par des mesures liées à la technologie du béton et, le cas échéant, par des mesures supplémentaires (chapitre 6.4).

Fig. 8.8.7:
Dépôt de gel silicaté dans les fissures et un pore d'air d'un béton dégradé (photo: lumière UV).

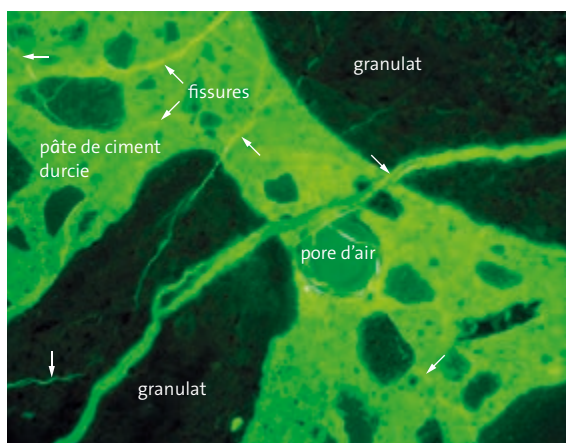
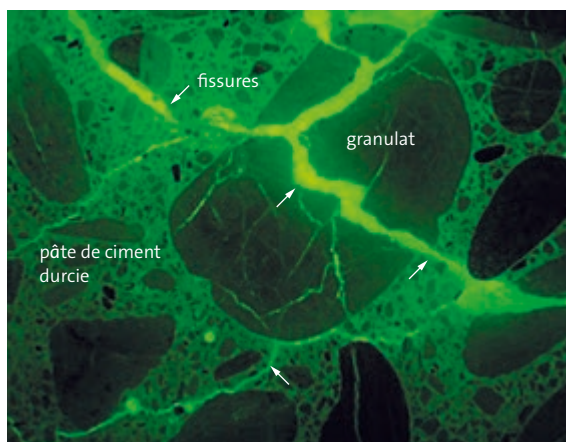


Fig. 8.8.8:
Fissuration typique due à la RAG du granulats et de la pâte de ciment (photo: lumière UV).



8.9 Dégradations liées à la corrosion de l'armature

8.9.1 Introduction

La corrosion de l'armature du béton armé et celle de toutes les insertions métalliques corrodables n'arrive que sous certaines conditions. Elle peut être empêchée pendant toute la durée de vie d'un ouvrage par une épaisseur et une qualité adéquate du béton d'enrobage. Il est également possible d'utiliser des aciers d'armature avec une résistance à la corrosion plus élevée si des exigences particulièrement sévères doivent être respectées (voir chapitre 3.10).

8.9.2 Typologie apparente

Surface du béton

Selon son ampleur, la corrosion de l'armature se remarque en surface du béton par des traces de rouille ou des décollements du béton d'enrobage (fig. 8.9.1). Les traces de rouille sont les premiers signes visibles en surface du béton. La formation de la rouille (hydroxyde de fer) à partir de l'acier s'accompagne d'une augmentation volumique de 2,3 fois le volume de l'acier. La pression qui en résulte conduit à la fissuration du béton d'enrobage et, à un stade plus avancé, à son décollement au-dessus des barres d'armature corrodées.



Fig. 8.9.1: Signes de corrosion visibles en surface du béton: traces de rouille (à gauche), décollements du béton au-dessus d'une armature corrodée (à droite).

Armature

L'armature subit une perte de sa section effective par la corrosion. Ceci a un impact direct sur la sécurité structurale de l'élément de construction. On distingue une corrosion régulière de la surface des barres suite à la carbonatation d'une corrosion ponctuelle par piqûres, induites par les chlorures. La perte de section provoquée par les piqûres de corrosion est généralement nettement plus prononcée et critique que celle induite par la carbonatation (fig. 8.9.2). La corrosion répartie régulièrement se caractérise par les éclatements du béton d'enrobage, tandis que la corrosion par piqûres reste souvent inaperçue et se développe sans signes extérieurs à la surface.



Fig. 8.9.2: Dégâts de corrosion d'une armature: érosion par corrosion régulière de la barre d'armature sous l'effet de la carbonatation (en haut), corrosion ponctuelle (piqûre) induite par des chlorures et uniquement visible en mettant à nu l'armature (en bas).

8.9.3 Causes et mesures préventives

L'acier d'armature est durablement protégé de la corrosion dans un béton alcalin, non carbonaté et non chargé en chlorures. Cette protection est offerte par la haute alcalinité de la solution interstitielle des pores de la pâte de ciment, dont les valeurs de pH se situent entre 12.5 et 13.5 selon le type et la quantité de ciment, ainsi que par d'éventuelles additions (p.ex. cendre volante, fumée de silice). Dans un milieu à valeur de pH élevée et en présence d'oxygène, une fine et durable pellicule nanométrique d'oxydes de fer (couche passive, passivation de l'acier) se forme à la surface de l'acier et empêche la corrosion de l'acier. La protection vis-à-vis de la corrosion repose essentiellement sur la densité, l'absence de défauts et l'adhérence de la couche passive et non pas sur son épaisseur. La couche passive protectrice à la surface de l'acier peut être détruite par deux mécanismes. Ils dépendent essentiellement de l'épaisseur, de la qualité du béton d'enrobage, ainsi que des conditions environnementales:

- La carbonatation conduit à un abaissement de la valeur du pH < 10 de la solution interstitielle des pores de la pâte de ciment et provoque une dépassivation générale de la surface de l'acier.
- Une concentration en chlorures critique est atteinte dans la solution interstitielle des pores du béton suite à l'infiltration de chlorures des sels de déverglaçage, de l'eau de mer, etc. Les chlorures traversent la couche passive ponctuellement et provoquent une dépassivation locale de la surface de l'acier.

La corrosion de l'armature commence, dès que trois conditions sont remplies:

- la destruction de la couche passive de l'acier d'armature (dépassivation)
- de l'humidité disponible (conductivité électrique du béton)
- de l'oxygène disponible

Dans les éléments de construction en permanence saturés en eau ou complètement secs, le risque de corrosion est faible, puisqu'il manque soit de l'oxygène soit de l'humidité. Par contre, des périodes alternantes d'humidité et de sécheresse augmentent le risque de corrosion. La pénétration du dioxyde de carbone (CO_2), des chlorures (Cl^-), d'eau (H_2O) et d'oxygène (O_2) jusqu'à l'armature est favorisée par des fissures d'une ouverture supérieure à 0.3–0.5 mm. Les fissures ne sont cependant pas une condition indispensable à l'apparition de la corrosion de l'armature.

La corrosion des matériaux métalliques est un processus électrochimique, comprenant une réaction partielle anodique (processus d'oxydation) et d'une réaction partielle cathodique (processus de réduction). Les deux réactions ont lieu simultanément et à vitesse identique (densité du

courant) à la surface de l'acier. La corrosion de l'armature produit des zones actives de corrosion à côté des zones passives qui forment ensemble ce qu'on appelle un élément de corrosion. Comparable à une pile électrique court-circuitée, l'anode (zone d'oxydation) et la cathode (zone de réduction) sont voisines et reliées électriquement à cause de l'humidité du béton (8.9.3). Il y a donc un courant électrique associé à l'érosion de l'acier d'armature (rouille) du côté de l'anode.

Si l'anode et la cathode sont de tailles microscopiques et voisines, on parle de micro-éléments. Ceux-ci mènent à une érosion répartie régulièrement sur la surface de l'acier et typique de la corrosion induite par la carbonatation (fig. 8.9.3 a). Par contre, si la cathode et l'anode sont plus espacées et de taille plus importante, on parle d'un macro-élément. Les macro-éléments se forment, en règle générale, lors de la corrosion induite par les chlorures et provoquent des piqûres de corrosion (fig. 8.9.3 b).

La réaction cathodique partielle produit de la rouille ainsi que de l'hydrogène qui peut pénétrer dans l'acier et contribuer à sa fragilisation. Ce processus est favorisé en présence d'une contrainte de tension élevée comme p.ex. dans des aciers précontraints. On parle alors de risque de «corrosion fissurante sous contrainte induite par l'hydrogène». Ce risque de corrosion fissurante sous contrainte existe lorsqu'un matériau de construction est soumis à de fortes contraintes de traction et subi en même temps une attaque de corrosion. Elle est particulièrement dange-

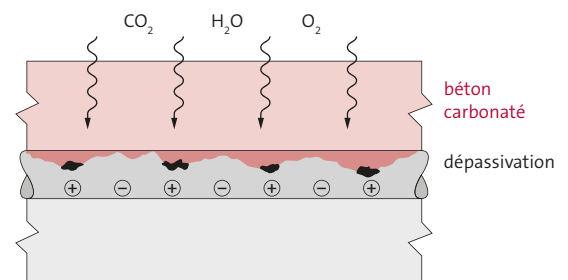


Fig. 8.9.3 a: Corrosion induite par la carbonatation dans un béton non fissuré, l'anode ⊕ et la cathode ⊖ étant voisines (micro-élément), la corrosion est répartie régulièrement sur la surface de l'acier.

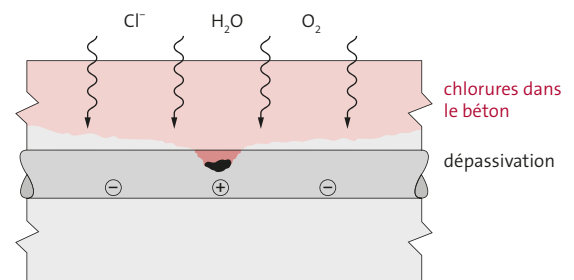


Fig. 8.9.3 b: Corrosion induite par les chlorures dans un béton non fissuré, l'anode ⊕ et la cathode ⊖ étant éloignées (macro-élément), il se développe des piqûres de corrosion.

reuse du fait qu'elle se produit sans signes annonciateurs et provoque une rupture subite de l'armature corrodée.

Les chlorures peuvent pénétrer plus facilement dans un béton fissuré et l'avancement de la carbonatation est plus important le long des fissures. Dès lors, les processus décrits auparavant s'intensifient (fig. 8.9.4).

Le courant de corrosion augmente lorsque la différence de potentiel entre l'anode et la cathode s'intensifie. Le courant partiel anodique passant par la surface de l'acier est une mesure de l'intensité de la corrosion. Il est déterminé quantitativement par des mesures de potentiel. Ces dernières doivent être vérifiées par des sondages et des mesures de la profondeur de carbonatation et des analyses des teneurs en chlorures.

Mesures préventives et principes de base de la remise en état

La protection de la corrosion de l'armature est essentielle pour la durabilité des constructions en béton armé. Pour les constructions neuves, on s'assure de l'épaisseur et de la qualité du béton d'enrobage (résistance à la carbonatation et aux chlorures, voir chapitre 3.10). Pour les ouvrages existants, la protection des armatures peut être rétablie avec différentes méthodes. L'objectif de toutes les mesures est d'éviter la corrosion en empêchant la réaction partielle anodique ou cathodique. On applique alors les principes de base suivants de la protection des armatures vis-à-vis de la corrosion.

Repassivation de l'acier d'armature

En enrobant l'acier d'armature avec un mortier ou un béton de réparation à base de ciment, la valeur du pH est à nouveau relevée de façon à obtenir une nouvelle couche passive à la surface de l'acier.

Revêtement de la surface de l'acier

En appliquant un revêtement approprié, p. ex. un produit de protection vis-à-vis de la corrosion à base de résine époxy, la réaction partielle anodique de décomposition du fer est empêchée. La conductivité électrique de la surface de l'acier d'armature est réduite à zéro. Aucun nouvel élément de corrosion ne peut alors se former.

Protection cathodique contre la corrosion (PC)

En appliquant un courant externe à l'armature et/ou en disposant des anodes inertes ou sacrificielles, toute l'armature fonctionne à la manière d'une cathode. En empêchant ainsi la corrosion dans l'armature, celle-ci a lieu exclusivement dans l'anode sacrificielle.

Inhibiteurs

Les inhibiteurs de corrosion sont des composés inorganiques ou organiques, qui peuvent, s'ils sont présents en concentration suffisamment élevée, ralentir ou empêcher la corrosion de l'acier dans le béton. On peut les ajouter aux mortiers ou bétons de réparation à base de ciment ou ils peuvent être appliqués ultérieurement au béton durci. Selon le type les inhibiteurs ont un effet cathodique ou anodique.

Abaissement de la teneur en eau

En réduisant la teneur en eau du béton, sa conductivité électrique et donc le flux des ions diminuent de manière à ce que la vitesse de corrosion devienne quasi négligeable. Un traitement hydrofuge de la surface du béton prévient p. ex. les infiltrations d'eau et de chlorures, tout en facilitant le séchage du béton (voir chapitre 7.1.4).

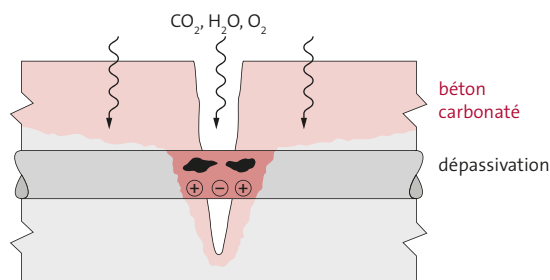


Fig. 8.9.4 a: Corrosion induite par la carbonatation dans un béton fissuré, la carbonatation avance plus vite le long de la fissure, l'anode \oplus et la cathode \ominus étant très proches dans la zone de la fissure (micro-élément).

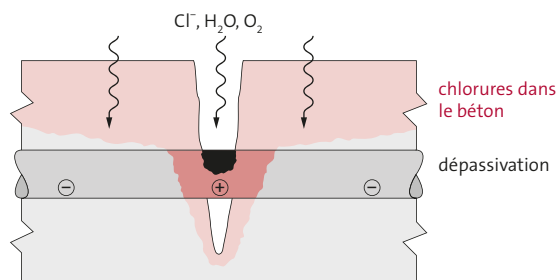


Fig. 8.9.4 b: Corrosion induite par les chlorures dans un béton fissuré, l'anode \oplus se trouve dans la zone de la fissure, la cathode \ominus se trouve éloignée dans le béton non fissuré (macro-élément), il se développe des piqûres de corrosion.